

Mastergradsoppg.
2010

HVITT OG SORT BLIR IKKE GRØNT
PRIS- OG VOLUMEFFEKTER I ENERGIMARKEDET VED
SAMTIDIG INNØRING AV HVITE OG SORTE SERTIFIKATER

WHITE AND BLACK DOES NOT MAKE GREEN
PRICE AND VOLUME EFFECTS IN THE ENERGY MARKET UNDER COMBINED USE
OF WHITE AND BLACK CERTIFICATES



MARTINE MOE WINSNES

UNIVERSITETET FOR MILJØ- OG BIOVITENSKAP
INSTITUTT FOR ØKONOMI OG RESSURSFORVALTNING
MASTEROPGAVE 30 STUDIEPOENG 2010



HVITT OG SORT BLIR IKKE GRØNT

Pris- og volumeffekter i energimarkedet ved samtidig innføring av hvite og sorte sertifikater

WHITE AND BLACK DOES NOT MAKE GREEN

Price and volume effects in the energy market under combined use of white and black certificates

Martine Moe Winsnes

Institutt for økonomi og ressursforvaltning
Masteroppgave 30 studiepoeng 2010

Forord

Denne masteroppgaven markerer avslutningen på en toårig mastergrad i samfunnsøkonomi ved Universitetet for miljø- og biovitenskap (UMB).

Gjennom graden har jeg fordypet meg i miljø- og energiøkonomi, og må få takke alle engasjerte forelesere ved UMB for to svært interessante år. En særlig takk rettes til Eirik Romstad og Torstein Bye, både for smittsomt engasjement innen miljø- og energiøkonomi, og for verdifull veiledning i arbeidet med denne masteroppgaven.

Takk til Eirik for diskusjoner og utforming i oppstartsperioden, og en oppfølging langt utover det vanlige. Takk til Torstein for uvurderlig hjelp til utformingen av den analytiske modellen samt modelleringen i GAMS. Takk for tilgjengeligheten, tilstedeværelsen og entusiasme. Både som forelesere og veiledere vil jeg gi dem de beste skussmål.

På toppen av listen av mine favorittøkonomer rager Einar; den beste samfunnsøkonomen av dem alle. Takk for tålmodighet og støtte, samt nyttige diskusjoner og tilbakemeldinger underveis i arbeidet. Og takk for at du har holdt ut med meg gjennom den tidvis frustrerende prosessen det har vært å skrive masteroppgave.

Til slutt må jeg også få takke familie og venner for å gi meg rom til å arbeide, og støtte til å fullføre. En særlig takk til Mats Arne, Marie, Emilie og Henriette for gjennomlesing. Alle studiekamerater gjennom de siste fem årene skal ha en takk for alle lærerike kollokvier og fagdiskusjoner, og alle lunch, middag og kaffepauser. Dere har gjort universitetslivet til mer enn bare lesesalen.

Alle eventuelle feil og mangler i oppgaven er mitt fulle og hele ansvar.

Mai 2010,

Martine Moe Winsnes

Sammendrag

Denne masteroppgaven analyserer innføringen av hvite sertifikater (sertifikat for energieffektivisering) i et energimarked som allerede er underlagt sorte sertifikater (marked for CO₂-kvoter). Hvite sertifikater innebærer at elektrisitetsforbrukerne blir pålagt et sparekrav. Dette medfører implisitt en subsidie til de som leverer produkter og tjenester som effektiviserer energibruken. Målet med de hvite sertifikatene er å fremme energieffektivisering, og ved det redusere kraftforbruket.

For å analysere pris- og volumeffektene i kraftmarkedet utvikles en modell for energimarkedet, energieffektiviseringsmarkedet og kvotemarkedet for utslippstillatelser. Den analytiske modellen presentert i denne oppgaven gir ikke klare priseffekter i sparemarkedet ved innføring av tvungen energisparing. Sparekravet innføres som en andel av omsatt kraft, og det redusert kraftkonsum kan dermed føre til redusert sparevolum. For å finne effektene fra sparekravet på selve sparingen gjennomføres en modellsimulering. Denne simuleringen gir økt sparing for realistiske sparekrav, og med det faller omsatt kraftvolum.

Den reduserte etterspørselen etter elektrisitet gjør at lønnsomheten går ned i kraftsektoren. Oppgaven deler kraftprodusentene i to hovedgrupper; grønne og sorte. Den første produsentgruppen benytter fornybare innsatsfaktorer i produksjonen, mens det er knyttet CO₂-utslipp til produksjon ved såkalt sort teknologi. Den reduserte lønnsomheten i kraftsektoren rammer begge produsentgruppene og fører til redusert kraftproduksjon fra både grønne og sorte produsenter.

Hvilken teknologi som reduserer omsatt volum mest er avhengig av antagelser om kvoteprisregime og elastisitetskombinasjoner, og oppgaven simulerer både under antagelse om eksogen og endogen kvotepris. Under forutsetning om eksogen kvotepris endres forholdet mellom nettoprisen for de to kraftprodusentene i grønn teknologi sin favør. Dersom kvoteprisen kan ansees som endogen vil det derimot være de sorte produsentene som kommer relativt best ut av sparekravet. Årsaken til dette er at ved lavere sort produksjon reduseres etterspørselen etter CO₂-kvoter, og prisen i CO₂-markedet faller. Denne kostnadsreduksjonen tilfaller kun de skitne kraftprodusentene, mens kraftprisfallet er identisk for begge teknologier. Som en følge av energieffektiviseringen kan derfor det relative forholdet mellom omsatt grønn og sort energi endres, i sort energi sin favør.

Abstract

This thesis analyses the implementation of white certificates (increased energy efficiency) in an energy market already bounded by black certificates (CO₂ permits). White certificates impose a restriction on energy consumption, (saving commitment) leading to a subsidy to energy efficiency producers. The objective of white certificates is to promote energy efficiency, and thereby reduce total energy consumption.

In order to analyze price and volume effects in the power market; the energy market, the market for increased energy efficiency and the market for emission permits are modelled. The analytical model presented in this thesis provides ambiguous price effects as a result of the imposed restriction on energy use. The saving commitment is imposed as a share of purchased power, and reduced power consumption may lead to reduced saving. To locate the effects of the saving commitment a model simulation is carried out. This simulation results in increased saving, leading to reduced power consumption.

This thesis shows that reduced demand for electricity will decrease the profitability in the power market. The energy producers are categorized into two groups; green and black. Green producers utilize renewable inputs while black production generates CO₂ emissions. The reduced profitability affects both groups, and as a result it leads to reduced power production for both green and black producers.

Assumptions made regarding the permit price regime and combinations of elasticities determine which of the two technologies will reduce production volume the most. Under the assumption of exogenous permit prices the relationship between net prices for the two power producing groups is altered in green technology's favour. Assuming the quota price to be endogenous one gets a situation where black producers will be the relative "winners". The reason for this is that the reduced demand for energy, hence reduced black production, will result in decreased demand for CO₂ permits and consequently the price in the CO₂ market will drop. This cost reduction only benefits the black producers, and as a result, increased saving commitment can alter the relationship between the profitability in green and black technology, in black technologie's favor.

Innholdsfortegnelse

1. Innledning.....	1
1.1 Problemstilling og hypotese	2
1.2 Begrensninger.....	3
1.3 Kort om resultatene.....	3
1.4 Oppgavens oppbygging	4
2. Eksternaliteter og instrumenter i energisektoren.....	5
2.1 Energieffektiviseringens fremmarsj og noen innvendinger.....	5
2.2 Internalisering av eksternaliteter.....	7
2.3 Europeisk instrumentbruk i energimarkedet.....	8
2.3.1 Sorte sertifikater	8
2.3.2 Hvite sertifikater.....	11
3. Tre berørte markeder.....	16
3.1 Elektrisitetsmarkedet	16
3.2 Energieffektiviseringsmarkedet.....	17
3.3 Kvotemarkedet for karbondioksidutslipp	18
3.4 Koblingene og totaleffekten	19
4. Analytisk tilnærming.....	21
4.1 Forutsetninger og forenklinger	21
4.2 Modellen.....	21
4.2.1 Tilbudssiden	22
4.2.2 Etterspørselsiden	23
4.3 Likevektsløsning ved eksogen kvotepris	23
4.4 Likevektsløsning ved endogen kvotepris.....	26
5. Datagrunnlag.....	29
5.1 Elektrisitetssektoren.....	30
5.2 Energieffektiviseringssektoren	31
5.3 Karbondioksidutslipp.....	32
5.4 Problemer med dataene.....	32
6. Simuleringsresultater	34
6.1 Eksogen kvotepris.....	35
6.2 Endogen kvotepris	39
6.3 Ulik utslippsintensitet	43
7. Diskusjon	48
7.1 Sensitivitetsanalyse.....	48
7.1.1 Sensitivitetsanalyse av pris- og volumeffekter ved eksogen kvotepris	49
7.1.2 Sensitivitetsanalyse av pris- og volumeffekter ved endogen kvotepris.....	51
7.2 Hypotesen og problemstilling i lys av diskusjonen	55
7.3 Modellspesifikke forutsetninger	56
8. Konklusjon.....	58
9. Litteratur	61
10. Vedlegg.....	64

10.1	Sparekrav pålagt forbruker versus produsent	64
10.2	Utrekninger	65
10.2.1	Eksogen kvotepris	65
10.2.2	Endogen kvotepris	67
10.3	Estimert kostnadskurve energieffektivisering.....	71
10.4	Den kalibrerte modellen benyttet i analysen.....	73
10.5	GAMS simuleringsmodell	75
10.6	Vedlegg til sensitivitetsanalysen.....	78
10.6.1	Eksogen kvotepris	78
10.6.2	Endogen kvotepris	82
10.6.3	Ulik utslippsintensitet.....	86
10.6.4	Ulike andeler i utgagnspunktet.....	87

Figuroversikt

Deler av figurene i oppgaven er ment illustrativt, og har ikke nødvendigvis riktig forholdstall. Kvalitative resultater er korrekte. An hensyn til illustrativ forenkling er grafer i figurene beskrevet med lineære kurver, til tross for senere antagelse om konstant elasticitet.

Figur 1	Kvotemarked med ulik etterspørsel elasticitet	9
Figur 2	Prisutvikling EU ETS. Kilde: Point Carbon, gjengitt i Klimakur (2009).....	11
Figur 3	Energisparekrav påført to forbrukere med ulik etterspørsel elasticitet	12
Figur 4	Markedsdynamikk for hvite sertifikater. Inspirert av Voogt et al. (2006).....	13
Figur 5	Sammenheng kraftmarkedet og sparemarkedet ved innføring av sparekrav	14
Figur 6	Aggregert tilbud av kraft	16
Figur 7	Økt etterspørsel i sparemarkedet gir økt pris	17
Figur 8	Redusert etterspørsel etter utslippstillatelser	19
Figur 9	Sammenheng mellom kraftmarkedet, sparemarkedet og kvotemarkedet	19
Figur 10	Redusert kvotepris gir skift i tilbud av sort energi.	20
Figur 11	Utvikling i kraftpris og –produksjon med og uten eksogen kvotepris.....	36
Figur 12	Utviklingen i sammensetning av energibærere ved eksogen kvotepris	37
Figur 13	Utvikling i sertifikatpris, total sparepris og sparevolum ved eksogen kvotepris... 37	
Figur 14	Utvikling for forbrukerne ved eksogen kvotepris.....	38
Figur 15	Endogen kvoteprisutvikling.....	40
Figur 16	Utviklingen sammensetning av energibærere ved endogen kvotepris.....	41
Figur 17	Endret sparepris og kvantum ved økt sparekrav	42
Figur 18	Forbrukertilpasning ved ulike andelskrav	42
Figur 19	Den mest utslippsintensive produsenten reduserer mest ved eksogen kvotepris... 44	
Figur 20	Utviklingen sammensetning av energibærere ved eksogen kvotepris	44
Figur 21	Endret sammensetning av sort produksjon	45
Figur 22	Nettopris ved økt andelskrav og to sorte produsenter	46
Figur 23	Skift i utslippskilde ved økt andelskrav.....	46
Figur 24	Utviklingen sammensetning av energibærere ved endogen kvotepris.....	47
Figur 25	Sensitivitetsanalyse av sammensetning av energibærere ved eksogen kvotepris.. 49	
Figur 26	Sensitivitetsanalyse av forbrukerprisen ved eksogen kvotepris	50
Figur 27	Sensitivitetsanalyse av endogen kvotepris	51
Figur 28	Sensitivitetsanalyse av utvikling i kraftprisen ved endogen kvotepris	53
Figur 29	Sensitivitetsanalyse av sammensetning av energibærere ved endogen kvotepris . 53	
Figur 30	Utvikling i forbrukerprisen ved eksogen og endogen kvotepris.....	54
Figur 31	Sparekrav pålagt forbruker versus produsent	64
Figur 32	Volumpotensial og kostnad energieffektivisering	71
Figur 33	Estimert kostnadskurve energieffektivisering	72
Figur 34	Kraftprisutvikling ved eksogen kvotepris.....	78
Figur 35	Kraftvolumsutvikling ved eksogen kvotepris.....	78
Figur 36	Relativ nettopris Sort og Grønn ved eksogen kvotepris	79
Figur 37	Relativt volum Sort og Grønn ved eksogen kvotepris.....	79
Figur 38	Totalprisutvikling for spareprodusenten ved eksogen kvotepris	80
Figur 39	Sparevolumsutvikling ved eksogen kvotepris	80
Figur 40	Forbrukerprisutvikling ved eksogen kvotepris	81
Figur 41	Totalforbruk ved eksogen kvotepris	81
Figur 42	Endogen kvoteprisutvikling.....	82
Figur 43	Kraftprisutvikling ved endogen kvotepris	82
Figur 44	Kraftvolumsutvikling ved endogen kvotepris	83
Figur 45	Relativ nettopris Sort og Grønn ved endogen kvotepris.....	83
Figur 46	Relativt volum Sort og Grønn ved endogen kvotepris	84
Figur 47	Totalprisutvikling for spareprodusenten ved endogen kvotepris.....	84
Figur 48	Sparevolumsutvikling ved endogen kvotepris.....	85
Figur 49	Forbrukerprisutvikling ved endogen kvotepris.....	85

Figur 50	Totalforbruk ved endogen kvotepris.....	86
Figur 51	Relativ volum Sort og Grønn ved ulik utslippsintensitet og eksogen kvotepris....	87
Figur 52	Utvikling i sort energi produsert ved ulikt andelsutgangspunkt.....	88

Tabelloversikt

Tabell 1	Ulike elastisitetskombinasjoner benyttet i sensitivitetsanalysen.....	48
Tabell 2	Forkortelser sparetiltak	72
Tabell 3	Sensitivitetsanalyse ved ulik utslippsintensitet	86

Symboler og forkortelser

Figurer

E^e	Etterspørsel etter energi
T^e	Totalt tilbud av energi
T^g	Tilbud av grønn energi
T^s	Tilbud av sort energi
e	Energikvantum
p	Energipris
E^w	Etterspørsel etter energieffektivisering
T^w	Tilbud av energieffektivisering
w	Energieffektiviseringskvantum
q	Energieffektiviseringspris
E^z	Etterspørsel etter utslippstillatelser
T^z	Tilbud av utslippstillatelser
z	Antall utslippstillatelser
t	Utslippstillatelsespris / kvotepris

Likninger

x_g	Kvantum grønn energi
g	Tilbudsfunksjon for grønn energi
x_s	Kvantum sort energi
h	Tilbudsfunksjon for sort energi
x_w	Kvantum energieffektivisering
m	Tilbudsfunksjon for energieffektivisering
z	CO ₂ -utslipp
j	Etterspørselsfunksjon etter utslippstillatelser
x	Kombinasjongode sort, grønn og sparing
d	Etterspørselsfunksjon etter kombinasjongodet
p_e	Pris energi
t	Kvotepris / skyggepris på utslipp
p_{sert}	Pris hvite sertifikater
p_w	Totalpris til energieffektiviseringsprodusenten
p_k	Forbrukerpris på kombinasjongodet
α	Sparekravet
γ	Transformasjonskoeffisient utslipp/ utslippsintensitet

Simuleringsmodellen

α	Sparekrav
p_e	Pris elektrisitet
p_{sert}	Sertifikatpris
p_k	Forbrukerpris (vektet gjennomsnitt av de to godene)
p_w	Pris til produsent av sparing
t	Kvotepris
X_s	Omsatt mengde sort energi
A_s	Kalibreringsfaktor sort tilbudsfunksjon
ε_s	Tilbudselastisitet sorte produsenter
X_g	Omsatt mengde grønn energi
A_g	Kalibreringsfaktor grønn tilbudsfunksjon

ε_g	Tilbudselastisitet grønne produsenter
X_w	Omsatt mengde sparing
A_w	Kalibreringsfaktor tilbudsfunksjon sparing
ε_w	Tilbudselastisitet spareprodusenter
X_d	Total etterspørsel etter de to godene
A_d	Kalibreringsfaktor etterspørselsfunksjonen
ε_d	Etterspørselsetastisitet
Z	Tillat utslippsmengde (total kvotemengde)
γ	Transformasjonskoeffisient utslipp

Forkortelser

EE	Energieffektivisering
HS	Hvite sertifikater
SS	Sorte sertifikater

1. Innledning

Global oppvarming og klimatrusselen fra utslipp av klimagasser møtes i dag med flere ulike virkemidler, både nasjonalt og internasjonalt. Det designes stadig nye instrumenter både for å imøtekomme behov for endringer, og for å vinne politisk popularitet. Høsten 2009 raste en offentlig diskusjon om innføringen av såkalte grønne sertifikater¹ i energimarkedet. Sverige og Norge arbeider med utviklingen av et felles marked for grønne sertifikater² til tross for flere samfunnsøkonomers advarsel om ”dyr og formålsløs moro” (Bye & Hoel 2009). I dag er et nytt el-sertifikat på fremmarsj i Europa, såkalte hvite sertifikater.

Klimagassutslippet fra verdens energitilbud økte med 145 prosent fra 1970 til 2004. Dermed er det energisektoren som opplevde sterkest vekst i utslippene i denne perioden (IPCC 2007). EU har i sin 20-20-20 visjon blant annet stadfestet et mål om 20 prosent reduksjon av CO₂-utslipp innen 2020, med 2005 som basisår (MEMO 2008). For å imøtekomme målet om redusert utslipp har en rekke industrier blitt underlagt et europeisk kvotemarked (sorte sertifikater) for CO₂-utslipp. Deler av debatten rundt grønne sertifikater omhandlet effektene av et grønt sertifikatmarked når det allerede eksisterer et slikt kvotemarked, se Bye og Hoel (2009). Det ble pekt på at den forventede reduksjonen i klimagassutslipp fra mer grønn energi ikke vil finne sted så lenge utslippsbeskrankningen i det europeiske kvotemarkedet er bindende.

I EU-direktivet nevnt over er det også fastsatt mål om 20 prosent energieffektivisering i forhold til utsiktene i energiforbruket i 2020. Hvite sertifikater har som formål å fremme energieffektivisering hos sluttbrukere i energimarkedet, og ved det redusere omsatt energi. Ved innføringen av et slikt virkemiddel vil flere markeder enn det partielle energieffektiviseringsmarkedet også bli berørt. Det er effektene av den resulterende energisparing fra det hvite sertifikatet denne oppgaven omhandler. Videre i oppgaven vil jeg henvise til dette som et sparekrav.

¹ Et grønt sertifikat er et bevis på at kraften produsert er produsert ved bruk av fornybare innsatsfaktorer. For hver enhet fornybar energi produsert mottar produsenten et grønt sertifikat. Forbrukerne pålegges å kjøpe sertifikater proporsjonalt med energiforbruket, og et marked er opprettet (Bye 2003).

² Det siktes mot innføringen av et felles sertifikatmarked fra 1. januar 2012 (Regjeringen 2009).

Hovedsektorene jeg ser på er elektrisitetsprodusenter og forbrukere, samt tilbydere av energieffektiviseringstjenester. I kraftproduksjonssektoren skiller jeg mellom såkalte grønne og sorte produsenter, med henholdsvis fornybare og ikke-fornybare innsatsfaktorer i produksjonen. Jeg modellerer energimarkedet, energieffektiviseringsmarkedene og kvotemarkedet for utslippstillatelser, og analyserer samspillet dem imellom. I analysen tar jeg høyde for at energisektoren allerede er underlagt en kvoteplikt for karbonutslipp, og ser dermed på effekten av å innføre et sparekrav i et marked som allerede er underlagt sorte sertifikater.

1.1 Problemstilling og hypotese

Hovedproblemstillingen i denne oppgaven er; *Hvordan endres tilpasningen i kraftmarkedet ved innføringen av energieffektiviseringskrav? Hvilke pris- og volumeffekter vil oppstå i kraftmarkedet, sparemarkedet og kvotemarkedet som følge av en slik politikk?* Hypotesen jeg jobber ut fra er som følger;

Energieffektiviseringen reduserer etterspørselen etter elektrisitet og dermed lønnsomheten i elektrisitetssektoren. Den reduserte lønnsomheten medfører redusert omsatt kvantum, og både grønne og sorte produsenter vil redusere produksjonen. Redusert sort produksjon reduserer etterspørselen etter CO₂-kvoter, og prisen i CO₂-markedet faller. Som en følge av energieffektiviseringen vil derfor det relative forholdet mellom lønnsomheten for grønn og sort energi endres. Under antagelse om eksogen pris på utslippet, og dermed endogent utslipp, vil konsekvensen for lønnsomhetsforholdet mellom grønn og sort teknologi bli annerledes.

Redusert kvotepris ved redusert sort produksjon vil kun inntreffe ved antagelse om endogen kvotepris, og dersom de sorte produsentene utgjør en tilstrekkelig stor del av etterspørselen på kvotemarkedet. I denne oppgaven vil alle analyser og resultater bli gjennomført både under antagelsen om endogen kvotepris og eksogen. Eksogen kvotepris oppstår når de sorte produsentene ikke har påvirkningskraft i kvotemarkedet, men er ”prisfaste” kvantumstilpassere. Problemstilling og hypotese vil bli diskutert under de to ulike antagelsene.

I artikkelen "Green Serves the Dirtiest", hvor samspillet mellom grønne og sorte sertifikater analyseres, viser Christoph Böhringer og Knut Einar Rosendahl (2009) at økt krav til grønne sertifikater kan medføre en fordel for den mest skitne kraftteknologien i økonomien. Denne artikkelen inspirerte meg til å utvikle hypotesen i denne oppgaven. Kort sagt, ønsker jeg å undersøke om noe liknende kan finne sted ved krav om økt energieffektivisering.

1.2 Begrensninger

Endringer i de tre markedene vil ha ringvirkning på hele økonomien da flere sektorer deltar i disse markedene, enten direkte eller indirekte, enn de som her analyseres. Jeg vil ikke ta høyde for disse endringene i denne analysen. Oppgaven tar heller ikke høyde for tidsdimensjonen, men presenterer en analyse ved bruk av en statisk modell. En siste forenkling er antagelsen om autarki³.

1.3 Kort om resultatene

Denne oppgaven undersøker pris- og volumendringer i energi-, energieffektiviserings- og kvotemarkedet ved innføring av energisparekrav. Først undersøker jeg hypotesen ved bruk av en analytisk tilnærming. Den analytiske fremstillingen av markedslikevekten gir bestemte negative endringer i energiprisen og reduksjon i den endogene kvoteprisen ved økt sparekrav. Når det kommer til endringen i sertifikatprisen, total energieffektiviseringspris og total forbrukerpris er derimot fortegnet ved økt sparekrav ubestemt. For å undersøke effekten på de ubestemte endogene variablene har jeg gjennomført en modellsimulering ved bruk av analyseverktøyet *The General Algebraic Modeling System* (GAMS).

Simuleringsmodellen gir økt sparing for alle realistiske sparekrav, og med det faller omsatt kraftvolum. Ved økt sparing faller etterspørselen etter kraft, og med det reduseres kraftprisen. Redusert kraftpris i kombinasjon med eksogen kvotepris taler for en forverring av lønnsomheten i den sorte teknologien relativt til den grønne. Dette skyldes at kvoteprisen utgjør en relativt større andel av nettoprisen ved lavere

³ Autarki blir av Weil (2005) definert som en situasjon der et land ikke samhandler økonomisk med resten av verden.

kraftpris. Den samme simuleringsmodellen bekrefter hypotesen om avtagende endogen kvotepris og bedret relativ lønnsomhet for de sorte produsentene.

Som en videreføring av alternativet med endogen kvotepris har jeg også sett på et alternativ med to sorte teknologier med ulikt utslippsnivå. Denne simuleringen forsterker poenget over, samt resultatet til Böhringer og Rosendahl (2009)

1.4 Oppgavens oppbygging

I det neste kapittelet diskuterer jeg noen av argumentene fremsatt i debatten om innføring av energieffektiviseringskrav. Videre presenteres konseptet eksternaliteter, før noe teori og empiri rundt sorte og hvite sertifikater gjennomgås. I kapittel 3 presenter jeg de tre markedene i analysen, og gir en begrunnelse for hypotesen. I det fjerde kapittelet presenteres den analytiske modellen som gir grunnlaget til simuleringsmodellen i kapittel 6. Før simuleringsresultatene presenteres gir jeg en gjennomgang av de empiriske dataene benyttet i simuleringen. I det syvende kapittelet diskuteres resultatene av sensitivitetsanalysen og problemstillingen og hypotesen, samt noen av de sentrale forutsetningene. Til slutt konkluderer jeg i det åttende kapittelet.

2. Eksternaliteter og instrumenter i energisektoren

Dette kapittelet presenterer noen av argumentene i diskusjonen rundt innføringen av energieffektiviseringskrav. Avsnitt to ser nærmere på eksternaliteter, og avsnitt tre går gjennom et eksempel på en eksternalitet og et instrument for å internalisere kostnaden av CO₂-utslipp; sorte sertifikater. Til slutt presenteres begrepet hvite sertifikater.

2.1 Energieffektiviseringens fremmarsj og noen innvendinger

Energieterspørsel i verden er økende, og samtidig som det forskes på produksjonsteknologier som kan møte denne økende etterspørselen, forskes det også på å bremse veksten i energiforbruket. Redusert forbruk av energi gjennom energieffektivisering (EE) blir stadig mer populært, i tråd med at sparetiltakene øker i antall.

Energieffektivisering dreier seg først og fremst om å kontrollere og redusere energieterspørselen utover det som forbrukes årlig. Redusert energieterspørsel forventes i den Europeiske Union (EU) å bidra positivt på flere ulike områder. Hovedargumentene for EE er knyttet til reduserte klimagassutslipp og økt forsyningssikkerhet. Det hevdes også at satsing på EE vil bidra til nye arbeidsplasser og teknologisk utvikling. Dermed kan investering i EE medføre et konkurransemessig fortrinn på en ettertraktet vare på verdensmarkedet og åpne for nye handelsmuligheter. EE antas å kunne bidra sterkt for å nå hovedmålene i EUs energipolitikk; økt forsyningssikkerhet, overkommelige energipriser, fremme et bærekraftig miljø og bekjempe klimaendringer (Child et al. 2008; Council of the European Union 2007; European Commission 2005; Fladen 2007; Lavenergiutvalget 2009; MEMO 2008; Porter & Linde 1995).

Det er en utbredt misforståelse at bruk av ulike tiltak som investering i fornybar teknologi eller energieffektivisering bidrar til reduksjon av CO₂-utslippet i Europa. Så lenge tilgjengelig kvantum i kvotemarkedet ikke endres vil ikke mengden utslipp endres⁴. Et tilleggsmoment er knyttet til hvem som rammes av instrumentbruken. Ved energieffektivisering vil både de sorte og de grønne produsentene oppleve redusert

⁴ Med unntak av oppkjøp og pensjonering av kvoter.

etterspørsel. Markedseffekten rammer flere enn bare de produsentene som er opphavet til eksternaliteten, og som bør reguleres. Argumentasjon med utspring i redusert CO₂ taler for et ønske om en vridning på produksjonssiden, og ikke et tiltak som rammer alle.

Når det gjelder økt forsyningssikkerhet finnes det virkemidler som er langt mer direkte enn EE. Hvilke virkemiddel som anbefales vil avhenge av hva som legges i begrepet forsyningssikkerhet. Dersom det er snakk om frykt for energiknapphet kan utbygging på tilbudssiden være et eksempel på et mer direkte instrument. Ved utbygging av dyrere produksjon vil prisene stige, og forbrukeren vil automatisk spare, gitt avtagende etterspørselsfunksjoner. Er det derimot frykt for sammenbrudd i forsyningsnettet vil direkte investeringer i forbedringer og utbygging av nettet fremstå som mer målrettet. Et tredje mål innen forsyningssikkerhet er knyttet til prissvingninger. Deler av elektrisitetsproduksjonen er avhengig av stokastisk tilsig av innsatsfaktorer, som vind og vann. Denne stokastikken, i kombinasjon med varierende forbruk avhengig av værforhold, gir opphav til store prissvingninger. Ett mulig virkemiddel for utjevning av priser kan være sparing ved lave priser, for deretter å bruke av oppsparte midler ved høye priser.

Når det kommer til argumentet om konkurransemessig fortrinn ved investering i teknologisk fremgang kan dette gi positive effekter i økonomien. Forskning og utvikling som resulterer i gode ideer kan ansees som kollektive goder, da de er både ikke-ekskluderende og ikke-rivaliserende i sin bruk (Weil 2005). Dermed kan investering i EE-sektoren generere positive eksternaliteter. Men et hvitt sertifikatmarked er ikke nødvendigvis den beste måten å generere en subsidie til denne sektoren. Som Amundsen (2008) peker på er *first mover advantage* innen en teknologi generelt et dårlig argument brukt av politikere som forsøker å etablere et fortrinn uten å ta hensyn til markedskrefter og aktørene i markedet.

Det eksisterer altså ulike innvendinger mot bruken av EE-krav som instrument i klima- og miljøpolitikken, og det største bruddet med samfunnsøkonomiske anbefalinger er kanskje knyttet til internalisering av eksternaliteter. Såfremt det ikke eksisterer eksternaliteter, vil et uberørt marked frembringe størst samfunnsøkonomisk overskudd.

2.2 Internalisering av eksternaliteter

En eksternalitet kan defineres som utilsiktede sideeffekter ved en handling som agenten ikke godskrives eller belastes, ved henholdsvis positive eller negative eksterne effekter. Tilstedeværelsen av eksternaliteter medfører et avvik mellom privat- eller bedriftsøkonomisk lønnsomhet og den samfunnsøkonomiske lønnsomheten.

Ved eksternaliteter knyttet til produksjon vil vi ved positive eksternaliteter få for lav produksjon, mens ved negative eksternaliteter vil vi få for høy produksjon, sammenlignet med det samfunnsøkonomisk optimale nivået. Dette gir opphav til et samfunnsøkonomisk tap, og det kan dermed argumenteres for bruk av ulike instrumenter for å oppnå internalisering av eksternaliteter. Dersom instrumentbruken er optimal vil innføringen medføre en fullstendig internalisering, og dermed maksimere det samfunnsøkonomiske overskuddet.

Et eksempel på en negativ eksternalitet er forurensning knyttet til produksjon eller konsum av et gode. Kull er en utbredt innsatsfaktor i produksjon av elektrisitet. I de bedriftsøkonomiske avveiningene vil prisen på kull veies opp mot prisen på elektrisitet når produksjonsavgjørelsen tas. Ved denne kullkraftproduksjonen produseres CO₂-utslipp som et biprodukt. Dette utslippet vil påvirke langt flere enn kraftverket, og representerer en kostnad for samfunnet. For at produsenten skal ta inn over seg den sanne samfunnsøkonomiske kostnaden kan det legges en skatt på bruken av kull. Dersom denne skatten er optimal vil hele den samfunnsøkonomiske kostnaden bli internalisert. Krav om deltagelse på kvotemarkedet vil virke på samme måten som en skatt, der kvoteprisen (som er en skyggepris på regulering) representerer skatten.

Innføringen av energieffektiviseringskrav bør legitimeres med et argument om en eksternalitet i forbruk av energi. En av innvendingene mot denne instrumentbruken er om det faktisk er eksternaliteter i energiforbruket, eller om eksternaliteten heller er knyttet til produksjon (se for eksempel Amundsen (2008)). Uten eksternaliteter vil energieffektiviseringskravet være tynnere begrunnet.

2.3 Europeisk instrumentbruk i energimarkedet

Energiproduksjon og -bruk er hovedkilden til klimagassutslipp, og en integrert klima- og miljøpolitikk er derfor fordelaktig (European Union 2008). To av instrumentene som er introdusert er sorte og hvite sertifikater, der de sorte er rettet mot redusert CO₂-utslipp, mens de hvite er et virkemiddel for økt energieffektivisering. Et felles marked for sorte sertifikater har eksistert siden 2005, mens hvite sertifikater kun er tatt i bruk i et fåtall unionens medlemsland⁵.

2.3.1 Sorte sertifikater

Denne oppgaven definerer omsettbare kvoter eller omsettbare utslippstillatelser i et *cap-and-trade* system som sorte sertifikater. Bruken av sorte sertifikater er myntet på utslipp av klimagasser, og setter et øvre tak på utslippet. Dersom dette taket fører til en bindende skranke vil det oppstå en positiv pris på kvotene i kvotemarkedet (se for eksempel Hanley et al. (2007)). Ulike sektorer blir underlagt kontroll, og må kjøpe tillatelser for hver enhet utslipp deres aktiviteter medfører. Alternativet til å kjøpe tillatelsene er naturlig nok å unngå utslipp, ved å benytte seg av tilgjengelig renseteknologi (eller legge ned virksomheten). Et siste alternativ er å bevisst jukse, og eventuelt betale straff ved overvåking.

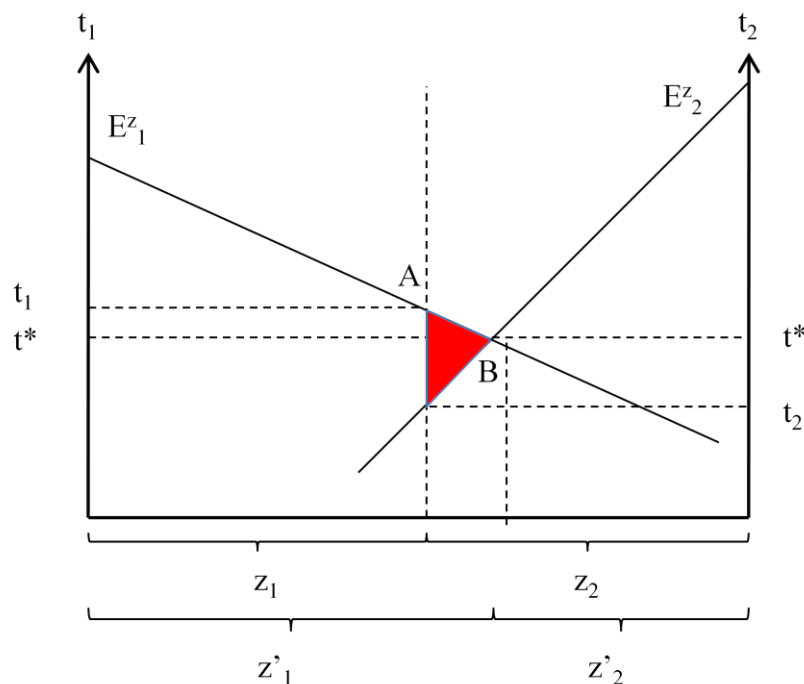
Denne oppgaven ser bort fra utforming av straff og overvåking, men i et system med sorte sertifikater vil dette være elementer som er av stor betydning. Et annet sentralt moment ved utformingen av et kvotesystem er hvordan aktørene skal anskaffe de første kvotene. En mulighet er å dele ut kvoter gratis ved oppstart, og deretter åpne for handel. En annen mulighet er å auksjonere bort kvotene. For diskusjon om design av og innføring av kvotesystem se for eksempel Strandlund et al. (2002) eller Tietenberg (2006).

Avveiningen mellom å kjøpe kvoter eller å rense vil avhenge av markedsprisen på kvotene og marginal rensekostnad. De ulike aktørene har ulike kostnader forbundet med rensing. Bruken av markedsbaserte instrumenter er attraktivt med tanke på

⁵ Frankrike, Storbritannia og Italia, mens Danmark og Nederland vurderer opprettelse av sertifikatmarkedet (Euro WhiteCert).

kostnadseffektivitet, og i et velfungerende marked vil aktørene fordele rensing mellom seg på en slik måte at rensekostnadene minimeres.

I figur 1 illustreres en situasjon med en gitt mengde tillatelser lik $z_1 + z_2$ fordelt mellom to firmaer. De to firmaene har ulike etterspørselsfunksjoner etter tillatelser som en følge av ulike marginale rensekostnader, se grafene E^z_1 og E^z_2 .



Figur 1 Kvotemarked med ulik etterspørselselastisitet

I første omgang kan vi tenke at det totale antallet tillatelser deles likt mellom de to firmaene. I dette punktet (se A) har de to firmaene ulik betalingsvilje for ytterligere en tillatelse, der firma 1 har høyere betalingsvilje enn firma 2 ($t_1 > t_2$). Denne forskjellen oppstår som følge av ulike marginale rensekostnader i de to firmaene, og uttrykkes gjennom ulik helning på etterspørselskurvene (E).

Uten handel oppstår et effektivitetstap i dette markedet for kvoter, tilsvarende den røde trekanten. Dersom det åpnes for handel mellom de to firmaene kan en unngå dette effektivitetstapet. Dette er en paretoforbedring som vil øke det samfunnsøkonomiske overskuddet. Firma 1 vil kjøpe tillatelser fra firma 2 helt til den prisen firma 2 krever for å gi opp en tillatelse er lik den prisen firma 1 er villig til å betale for den samme tillatelsen. Dette vil skje til prisen t^* , der marginal rensekostnad

i de to firmaene er lik hverandre, og lik prisen, se punkt B (Bye & Bruvoll 2008). Det er den marginale rensekostnaden som avgjør den marginale verdsettingen av kvotene.

Under utslippskontroll-regimet oppstår det et marked for retten til å forurenses. Total mengde utslipp er satt, og så lenge denne beskrankningen er bindende må økt utslipp ett sted motsvares med like stor reduksjon et annet sted. Likevektsprisen som bestemmes i markedet gir retten til å forurenses en verdi, og det oppstår en alternativkostnad for utslipp, eller en skyggepris på utslipp. Et minstekostnads kontrollregime impliserer at marginal rensekostnad er lik for alle aktørene som er underlagt kontroll (Perman et al. 2003). I optimum skal ikke bare alle marginale rensekostnader (MAC) være like, det skal også være likhet mellom MAC og markedsprisen.

Dersom markedet er effektivt og uten at noen aktører har markedsrett, vil prisen som oppstår i kvotemarkedet ha samme effekt som en optimal skatt, under forutsetning om at kvotemengden som er satt reflekterer optimalt utslipp. De samfunnsøkonomiske kostnadene blir internalisert i produksjons- og konsumavgjørelsene.

I Europa eksisterer det allerede et slikt kvotemarked, og energisektoren er allerede underlagt denne kontrollen. EU-direktiv 2003/87/EC la grunnlaget for opprettelsen av det europeiske kvotemarked, kjent som *European Union Emission Trading System* - EU ETS (European Union 2003).

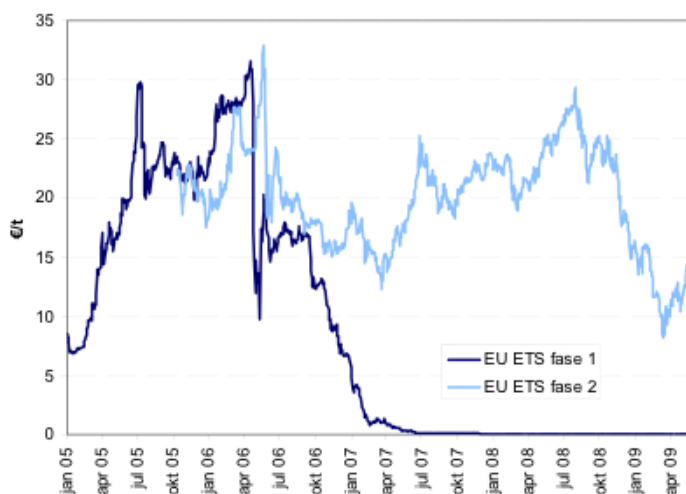
Fra oppstarten i 2005 og frem til 2020 har EU ETS blitt inndelt i tre faser. Frem til år 2007 var markedet inne i fase I, som er kjent som en slags testperiode. Fasen vi nå er inne i, fase II, tar mål av seg å fullføre Kyoto-kravene før perioden er over i 2012. I denne fasen åpnes det også for å møte rensekravet gjennom den grønne utviklingsmekanismen (*Clean Development Mechanism* - CDM) og felles implementering (*Joint Implementation* - JI)⁶. CDM og JI kan bremse prisveksten i kvotemarkedet, i en fase der flere sektorer underlegges kontroll. Fase III, den siste fasen, starter i 2013 og varer til 2020. I denne perioden vil kvotemarkedet bli

⁶ CDM åpner for investering i CO₂ reduksjon i land som ikke er underlagt Kyoto-avtalen, mens JI åpner for investering i andre deltakerland.

strammere, ytterligere sektorer underlegges kontroll og antall gratiskvoter reduseres til fordel for bortauksjonering. Målet er å nå 20 prosent reduksjon av CO₂-utslipp i forhold til 1990-nivå (European Commission 2010).

Figur 2 viser prisutviklingen i markedet siden oppstarten. Prisen i markedet bestemmes i likevekt mellom tilbud og etterspørsel. Den mørke linjen beskriver prisbevegelsene i fase I. Den totale kvotemengden ble fastsatt i 2004-2005, under usikker kunnskap om utslippsmengde. Da utslippstallene ble verifisert i 2006 ble det klart at den totale utdelingen var for stor. Dette, i kombinasjon med at det ikke var mulig å overføre ubrukte kvoter fra fase I til fase II førte til at prisene falt kraftig. Dette er en indikasjon på at markedet er velfungerende.

Salget av kvoter for fase II startet før 2008, illustrert ved den lyseblå linjen. I fase II er det mulig å overføre kvoter til den tredje, og siste fasen. Dette antas å forhindre kvoteverdier nær null. Mot slutten av 2008 falt for øvrig prisene, som en følge av nedsatt økonomisk aktivitet etter finanskrisen (Klimakur 2009).



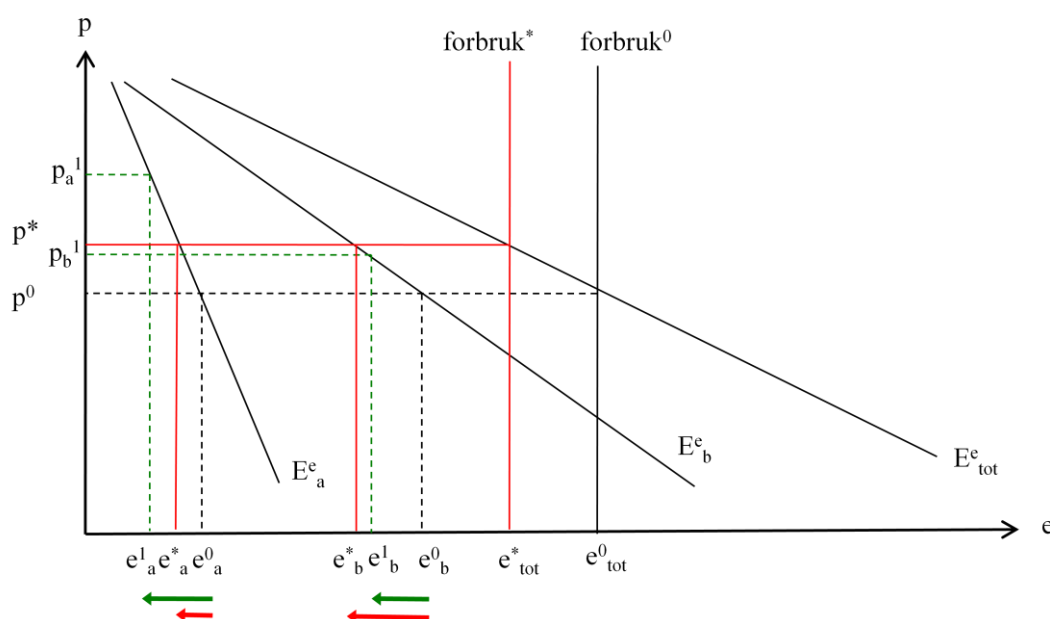
Figur 2 Prisutvikling EU ETS. Kilde: Point Carbon, gjengitt i Klimakur (2009).

2.3.2 Hvite sertifikater

Hvite sertifikater er et instrument som benyttes i handelen med EE-forpliktelser, i tråd med de sorte sertifikatene. Ved et uttrykt ønske om spart energi kan alle pålegges et prosentvis sparekrav. Siden elastisiteten i energimarkedet er varierende mellom deltakerne betyr det at alle påføres ulike skyggepriser. Det er derfor optimalt med

handel med sparekravene, eller bruk av hvite sertifikater. Dette markedsbaserte instrumentet bruker markedskreftene til å minimere kostnadene av reguleringen.

Figur 3 illustrerer to ulike alternativer for å oppnå en gitt mengde sparing. Den første tillater ikke handel, mens den andre åpner for handel, og gir dermed samme kvantumsreduksjon til en lavere samfunnsøkonomisk kostnad. De to forbrukerne a og b utgjør total etterspørsel i økonomien. I utgangspunktet forbruker de til sammen mengden energi tilsvarende e_{tot}^0 . Ved ønsket nedgang i forbruket til nivået e_{tot}^* er et alternativ å avkreve like stor kvantumsreduksjon fra hver av de to forbrukerne. Som en følge av ulik elastisitet vil denne reduksjonen påføre de to forbrukerne ulik prisøkning, illustrert ved de grønne stiplede linjene. Forbruker a er minst prisfølsom og opplever en skyggepris på reduksjonskravet tilsvarende avstanden mellom p_a^1 og p^0 . For forbruker b er skyggeprisen lavere, og lik avstanden fra p_b^1 og p^0 .



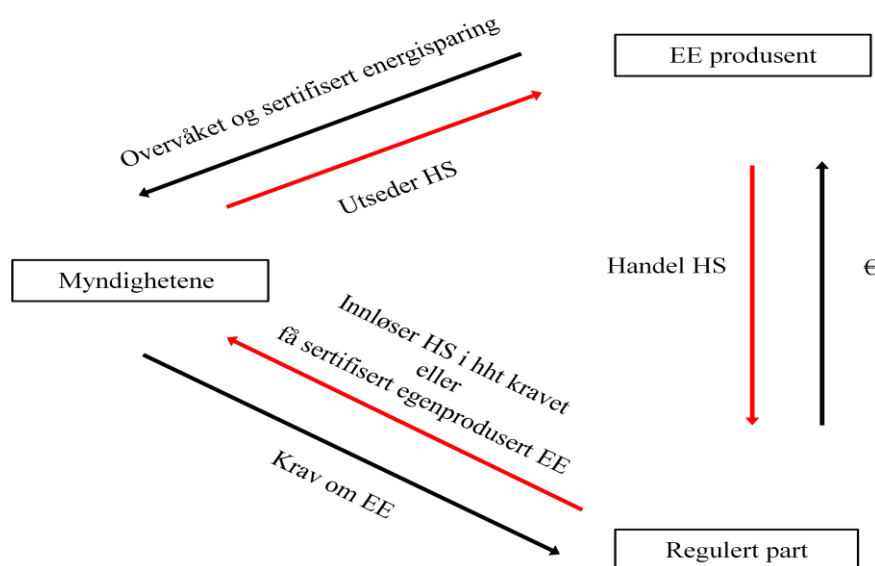
Figur 3 Energisparekrav påført to forbrukere med ulik etterspørselselastisitet

Et annet alternativ er å fordele reduksjonskravet mellom forbrukerne og deretter la dem handle. I et velfungerende marked vil den resulterende prisen bli lik p^* i figur 3, der forbruker a reduserer sitt forbruk mindre enn forbruker b, som er mest prisfølsom. Handelen finner sted helt til de to forbrukerne står ovenfor den samme skyggeprisen på reduksjonen, i tråd med figur 1 (side 9).

Hensikten med et marked for sparing er å gjennomføre sparingen billigst mulig, og denne handelen med energisparing kan foregå gjennom handel med hvite sertifikater som byttmiddel. Et hvitt sertifikat (HS) er en dokumentasjon på gjennomført energieffektivisering. For å fremprovosere et marked for sertifikatene må myndighetene innføre krav om kjøpsplikt, og de må sertifisere utstedere.

Innenfor dagens systemer i kraftsektoren har elektrisitetsforhandlere eller distributører en kjøpsplikt for hvite sertifikater. Det vil si at de må innløse en viss andel hvite sertifikater, proporsjonalt med kvantum energi solgt eller levert. Aktørene kan velge mellom å produsere energisparetiltakene selv, eller kjøpe denne tjenesten av en tredjepart, en tilbyder av energisparing. Figur 4 illustrer markedsdynamikken.

Av figuren kommer det frem at det er myndighetene som utsteder sertifikatene, og er det fungerende kontrollorganet i markedet. Det er de som pålegger kjøpskravet og det er de som utsteder sertifikater, og godkjenner investeringer.

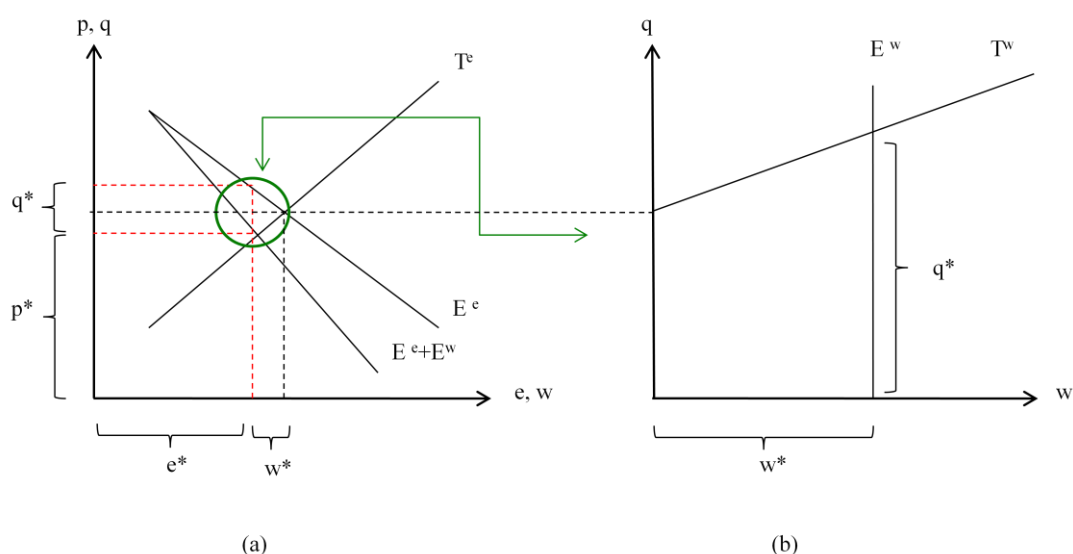


Figur 4 Markedsdynamikk for hvite sertifikater. Inspirert av Voogt et al. (2006).

Dersom den regulerte parten selv produserer energieffektivisering må de få produksjonen godkjent, på samme måte som EE-produsentene. Alternativt kan de altså kjøpe denne tjenesten. Som en følge av dette vil energieffektiviseringen bli gjennomført av de som billigst frembringer sparte kWh. Den regulerte parten vil kjøpe HS frem til prisen på sertifikatet overgår marginalkostnaden ved å selv produsere effektiviseringen. For å få utstedt HS må EE-produsentene fremlegge bevis

for gjennomført effektiviseringstiltak hos sluttbrukerne i markedet. Det er gjennom dette den faktiske energisparingen finner sted, og myndighetene oppnår energieffektivisering utover allerede realisert nivå. De hvite sertifikatene brukes som et byttemiddel for å frembringe et minste kostnadsregime (Voogt et al. 2006).

Kravet om investering i EE virker dermed som en kombinasjon av en avgift og en subsidie, der energisektoren skattlegges, mens spareprodusentene vil mottar subsidie. Figur 5 illustrerer skiftet i begge markedene, der diagram (a) representerer energimarkedet før og etter sparekravet. Diagram (b) illustrer det som skjer i sparemarkedet når det innringede skiftet i energimarkedet finner sted.



Figur 5 Sammenheng kraftmarkedet og sparemarkedet ved innføring av sparekrav

Før sparekravet innføres er kraftmarkedet i likevekt i skjæringspunktet mellom tilbudskurven (T^e) og etterspørselskurven (E^e). Når forbrukerne underlegges et sparekrav skifter og vris etterspørselen til E^e+E^w -kurven. Denne kurven representerer etterspørselen etter både kraft og sparing, og vridningen oppstår under antagelse om stigende marginalkostnadskurve i sparemarkedet.

Ettersom all lønnsom sparing, w , antas å være gjennomført, vil den pålagte sparingen ved innføringen av sparekravet ha en høyere pris per kWh enn den initiale kraftprisen. Det oppstår derfor en positiv skyggepris på sparebetingelsen, betegnet ved prisen q^* , og totalprisen per kWh øker for forbrukerne. Denne skyggeprisen vil stige langs tilbudskurven av sparing.

Etter innføringen av sparekravet er den nye likevekten i energimarkedet betegnet ved de røde stiplede linjene. Kraftprodusenten mottar nå en lavere pris, p^* , forbrukerne betaler en høyere pris, gitt av p^*+q^* , mens forbruket av energikrevende goder er holdt konstant.

Når det innføres krav om energieffektivisering vil det si at myndighetene ønsker omsetning utover den som allerede gjennomføres i markedet. Dette vil med andre ord være krav om investeringer som markedet ikke finner lønnsomme. Innføring av effektiviseringskrav forsøkes legitimert med bakgrunn i problemer knyttet til asymmetrisk informasjon, som medfører at den optimale markedsløsningen ikke realiseres. Det er ikke alltid like lett for forbrukerne å orientere seg i den jungelen av enøk-tiltak som finnes tilgjengelig. Amundsen (2008) peker på at dette er et argument for økt opplysningsvirksomhet og veiledning, og ikke et argument for økt forbrukskontroll.

Designproblemer og de store transaksjonskostnadene er andre diskusjonsaspekter knyttet til det hvite sertifikatmarkedet, for nærmere informasjon se Euro WhiteCert Project, Mundaca (2007; 2008), Transue og Felder (2010), Quirion (2006).

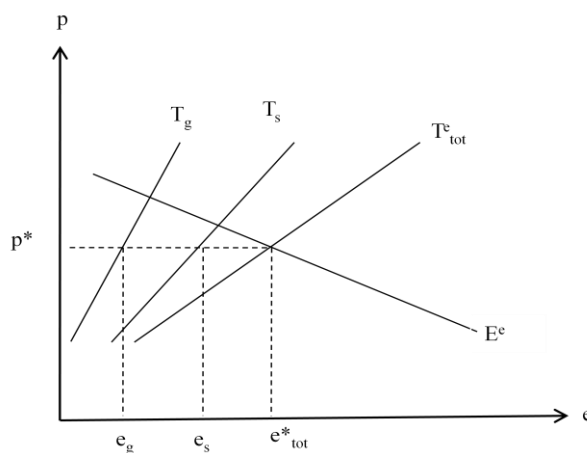
3. Tre berørte markeder

De tre berørte markedene i som inngår i den partielle likevektsanalysen i denne oppgaven er elektrisitetsmarkedet, energieffektiviseringsmarkedet og kvotemarkedet for karbondioksidutslipp. Jeg vil i dette kapitlet beskrive de tre markedene, samt presentere grunnlaget for hypotesene fremsatt i innledningen.

3.1 Elektrisitetsmarkedet

I dette markedet møtes tilbydere og forbrukere av elektrisitet. Denne oppgaven ser bort fra forhandlerleddet, og anser produsent og tilbyder av energi som samme enhet. Modellen skiller som nevnt mellom grønne og sorte produsenter. Ved sort produksjon benyttes innsatsfaktorer som medfører klimautslipp, og som et biprodukt av energiproduksjon blir CO_2 produsert.

Under antagelse om fri konkurranse i energiproduksjonen vil tilbudskurven reflektere marginalkostnadene i produksjon. Sort og grønn energi er perfekte substitutter, og den rimeligste energien blir omsatt først. Figur 6 illustrer hvordan totalt tilbudt energi fra sorte (T^s) og grønne (T^g) produsenter blir aggregert til en total tilbudskurve (T^e_{tot}). Likevektsprisen i elektrisitetsmarkedet, p^* , oppstår i skjæringspunktet mellom den aggregerte tilbudskurven og en aggregert etterspørselskurve etter energi, representert ved kurven E^e . Sammensetningen av sort og grønn energi vil avhenge av forholdet mellom marginalkostnadene i de to sektorene.

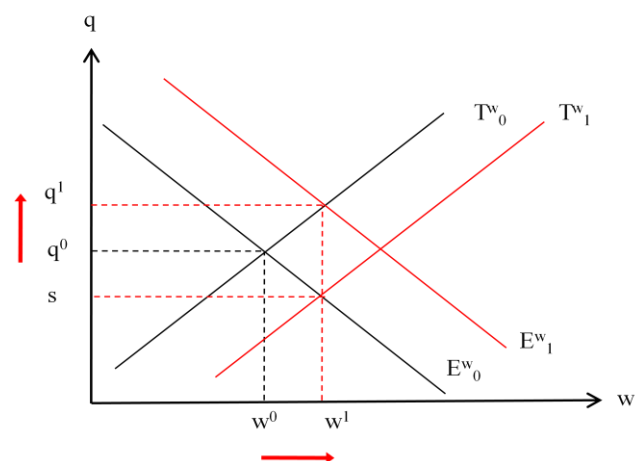


Figur 6 Aggregert tilbud av kraft

3.2 Energieffektiviseringsmarkedet

Det er omfanget av energieffektiviseringsmarkedet de hvite sertifikatene er rettet mot. I dette markedet deltar den profittmaksimerende tilbyderen av energieffektivisering⁷ og nyttemaksimerende konsumenter. Konsumentene er de samme som deltar i elektrisitetsmarkedet. Her antas det at konsumentene velger den kombinasjon av energi og energieffektivisering som fremskaffer forbruk av en gitt mengde energikrevende goder mest kostnadseffektivt. Under antagelse om rasjonelle aktører vi derfor alle kostnadseffektive energieffektiviseringsinvesteringer allerede være gjennomført. Dersom myndighetenes mål er mer ambisiøst enn den resulterende markedsklareringen kan de intervenere i markedet for å oppnå den ønskede likevektsløsningen.

Under antagelse om stigende marginalkostnader i produksjon kan markedet illustreres som i figur 7. Før myndighetens inngrep oppstod likevektsprisen, q^0 , i skjæringspunktet mellom den aggregerte tilbudsfunksjonen, T^w , og den aggregerte etterspørselsfunksjonen, E^w_0 . Ved krav om økt forbruk av energieffektivisering vil etterspørselsfunksjonen få et positivt skift, illustrert ved E^w_1 . I den nye likevekten har både omsatt kvantum, w , og prisen, q , økt, til henholdsvis w^1 og q^1 . Alternativt kan vi oppnå den samme likevekten gjennom å subsidiere tilbud av sparing, som gir et skift i tilbudskurven fra T^w_0 til T^w_1 , der avstanden fra q^1 til s tilsvarer subsidien.



Figur 7 Økt etterspørsel i sparemarkedet gir økt pris

⁷ I denne oppgaven antas energieffektiviseringsprodusentene å være profittmaksimerende. Det kan tenkes en ordning der staten støtter EE slik at de organiseres som non-profit organisasjoner.

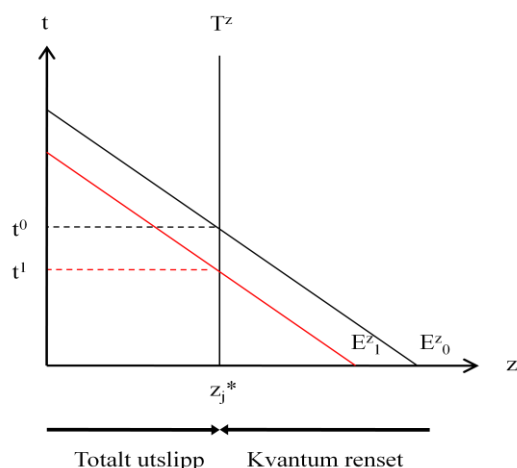
Energieffektiviseringsmarkedet er direkte linket opp til elektrisitetsmarkedet. Økt investering i EE vil potensielt⁸ medføre redusert etterspørsel etter energi, samtidig som prisen per enhet EE stiger med mengden som følge av stigende marginalkostnad (se figur 5). Det er koblingen mellom energi- og kraftmarkedet som gir opphavet til den første delen av hypotesen; *ved krav om økt investering i energieffektivisering vil etterspørselen etter kraft falle, og dermed vil omsatt kvantum i kraftmarkedet falle.*

3.3 Kvotemarkedet for karbondioksidutslipp

Ved bruk av sorte innsatsfaktorer vil CO₂ bli produsert som et biprodukt av kraftproduksjonen. Utslippsintensiteten per kWh energi produsert avhenger av innsatsfaktoren i produksjonen. Før myndighetene innfører et sort sertifikatmarked vil mengden CO₂-utslipp fra kraftmarkedet avhenge av likevektstilpasningen i energimarkedet, og transformasjonskoeffisienten for CO₂-utslipp. Det er ingen pris på CO₂ før en skatt eller et kvotemarked opprettes. Dynamikken i kvotemarkedet er beskrevet i avsnitt 2.3.1, der det fremkommer at de marginale rensekostnadene gir opphav til etterspørselsfunksjonen, og dermed prisen på kvotene.

Figur 8 illustrer kvotemarkedet, med en aggregert etterspørselskurve, E^c . Etterspørselen etter kvoter er et uttrykk for marginal rensekostnad ($MAC(z)$), der de produsenter med høyest $MAC(z)$ evaluert ved dagens initiale kvote, z_j^* vil ha høyest betalingsvillighet for utslippstillatelser. Tilbudet av kvoter er satt av myndighetene, representert ved den vertikale tilbudsfunksjonen T^c . I figuren oppstår det en likevektspis, t , i punktet der etterspørselen er lik tilbudet. Alle med $MAC(z_j^*)$ lavere enn kvoteprisen vil velge å rense utslippet, mens de med $MAC(z_j^*)$ høyere vil velge å kjøpe kvoter. z_j^* betegner total mengde tillatt utslipp, og likevektsprisen t vil være lik marginalkostnaden for den siste enheten CO₂ som blir renset.

⁸ Jevons' paradoks illustrerer at økt effektivisering kan medføre økt konsum av den aktuelle ressursen (Alcott 2005).

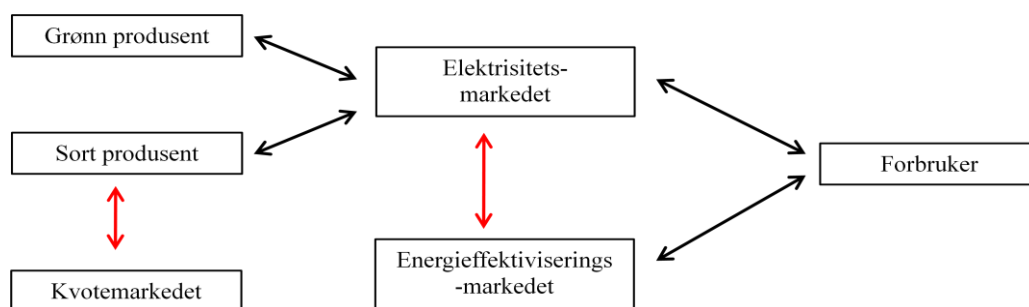


Figur 8 Redusert etterspørsel etter utslippstillatelser

Dersom den første delen av hypotesen ikke kan avvises og omsatt kvantum i energimarkedet faller, vil både grønn og sort kraftproduksjon falle. Dette gir grunnlag for del to av hypotesen; *ved redusert produksjon av sort energi vil etterspørselen etter utslippstillatelser falle, og kvoteprisen reduseres*. I figur 8 er dette illustrert ved skiftet i etterspørselskurven fra E^z_0 til E^z_1 , med den resulterende prisreduksjonen fra t^0 til t^1 .

3.4 Koblingene og totaleffekten

Alle de tre markedene over henger altså sammen, og en endring i ett av dem vil forplante seg videre til de andre markedene. Figur 9 illustrer hvordan de tre markedene er koblet sammen. De røde pilene illustrerer markedskoblinger fremprovosert av myndighetene.

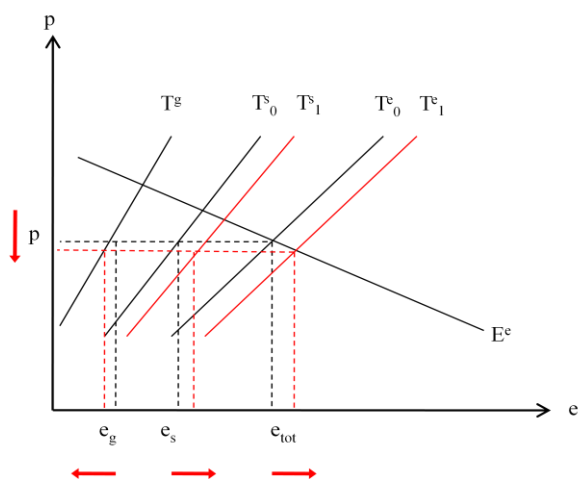


Figur 9 Sammenheng mellom kraftmarkedet, sparemarkedet og kvotemarkedet

Ved innføringen av energieffektiviseringskrav vil tilpasningen i elektrisitetsmarkedet endres. Dette vil påvirke alle deltakerne i markedet, og som beskrevet over vil tilpasningen i kvotemarkedet endres. Det er denne endringen som gir opphavet til den tredje, og siste, delen av hypotesen fremsatt i denne oppgaven; *som en følge av*

energieffektiviseringskravet fremsatt av myndighetene vil relativforholdet mellom grønn og sort energi produsert endres, i sort energi sin favør.

Når prisen i CO₂-markedet faller, vil marginalkostnadene til de sorte produsentene også falle, mens den for de grønne forblir uendret. Dette illustreres⁹ i figur 10 ved et positivt skift i tilbudskurven for sort energi, fra T^s_0 til T^s_1 . Når tilbudet fra de sorte produsentene øker, vil totalt tilbud også øke, fra T^e_0 til T^e_1 . Dette skiftet vil drive likevektsprisen ned, og denne prisnedgangen vil påvirke alle markedsaktørene. Av figuren ser vi at produksjonen i den sorte sektoren øker, mens totalt tilbud fra de grønne produsentene, representert ved T^g , faller. Dermed endres sammensetningsforholdet mellom energibærere brukt i kraftproduksjonen ved redusert kvotepris.



Figur 10 Redusert kvotepris gir skift i tilbud av sort energi.

Totalt predikerer hypotesen at redusert omsatt energikvantum faller CO₂-prisen, noe som gir opphav til endret relativforhold mellom energibærere i kraftproduksjonen.

Når det kommer til den totale sparingen er det ikke opplagt om den vil stige eller falle. Årsaken til dette er at kravet påføres som en andel av omsatt energi. Dersom forbruket av energi faller tilstrekkelig, vil det være mulig å oppnå en situasjon der total mengde omsatt EE vil falle med økt EE-krav.

I det neste kapittelet presenteres en analytisk modellering av de tre markedene.

⁹ Jeg ser i illustrasjonen bort fra utslippstaket.

4. Analytisk tilnærming

Artikkelen ”On the Price and Volume Effects from Green Certificates in the Energy Market” (Bye 2003) har vært en svært inspirerende kilde i arbeidet med den analytiske tilnærmingen i denne oppgaven, og dens metode har stått sentral i mitt arbeid¹⁰. Jeg vil i dette kapitlet presentere den matematiske modellen som ligger til grunn for den empiriske analysen presentert i neste kapittel.

4.1 Forutsetninger og forenklinger

Energimarkedet forenkles til å bestå av én representativ produsent, som tilbyr både energi (med to teknologier) og energieffektivisering (EE), og én representativ konsument som etterspør de to godene. Tilgjengelig produksjonsteknologi i energisektoren består av grønn og sort teknologi, der sort produksjon forutsettes å være underlagt det sorte sertifikatmarkedet. Videre antas et velfungerende marked, uten markedsrett og med rasjonelle aktører. Modellen er statisk og forutsetter autarki. Symboler defineres etter hvert som de dukker opp. For en oversikt se side ix.

Energieffektiviseringskravet legges her direkte på forbrukerne. Dette vil ikke ha betydning for resultatet, men forenkler analysen noe. Se vedlegg 10.1 for en diskusjon av forenklingen.

4.2 Modellen

Her modellerer jeg energi- og energieffektiviseringsmarkedet, mens CO₂-markedet i første omgang ikke modelleres eksplisitt. Etter en gjennomgang av løsningen med eksogen kvotepris vil jeg presentere resultatet med endogen kvotepris (skyggepris på CO₂-skranken). Først vil jeg presentere den partielle likevekten, før jeg deretter ser nærmere på effekten av endret energieffektiviseringskrav som et eksogent sjokk.

¹⁰ Amundsen og Bye (2010) ser nærmere på kombinasjonen av grønne og hvite sertifikater, som er to andre interessante kombinasjoner av aktuelle sertifikater.

4.2.1 Tilbudssiden

På tilbudssiden finner vi både tilbud av elektrisitet og av energieffektivisering. Tilbud av grønn energi x_g er en funksjon g av prisen på energi p_e

$$(1) \quad x_g = g(p_e)$$

der tilbudet er antatt stigende i energiprisen $\frac{\partial g}{\partial p_e} > 0$

Tilbud av sort energi, x_s , er en funksjon h av både energiprisen og kvoteprisen t

$$(2) \quad x_s = h(p_e, t)$$

der tilbudet er antatt stigende i energiprisen, $\frac{\partial h}{\partial p_e} > 0$

og fallende i kvoteprisen, $\frac{\partial h}{\partial t} < 0$

Nettoprisen per enhet sort energi er dermed lavere enn for grønn energi, som en følge av positiv skyggepris på utslipp av CO₂. t behandles som en unison skatt per enhet energi produsert. Utslippene z forenkles til å være en lineær j -funksjon av produsert sort energi, $z = j(x_s)$ altså proporsjonal med produksjonen. Dette er en sterk forenkling av virkeligheten med heterogene produksjonsenheter. I diskusjonskapittelet vil jeg komme tilbake til hvordan heterogenitet vil slå ut i markedstilpasningene ved redusert kvotepris. For nå antas $j(x_s) = \gamma x_s$ der γ angir utslippsintensiteten i produksjonen. Enhetsskatten per kWh kan defineres som $t = \gamma T$ der T er pris per enhet utslipp z .

Tilbudet av energieffektivisering, x_w , er en funksjon m av energiprisen og sertifikatprisen for energisparing p_{sert}

$$(3) \quad x_w = m(p_e, p_{sert})$$

der tilbudet av energieffektiviseringen antas stigende i begge prisene

$$\frac{\partial m}{\partial p_e} > 0$$

$$\frac{\partial m}{\partial p_{sert}} > 0$$

Som en følge av antagelsen om substitusjonsmuligheter mellom energi og EE vil én kWh av hvert gode ha samme verdi for forbrukeren, som dermed har lik

betalingsvillighet for de to godene. Når myndighetene oppretter det hvite sertifikatmarkedet vil det virke som en subsidie for produsentene av energieffektivisering. Prisen EE-produsenten mottar, P_w , er lik energiprisen pluss sertifikatprisen, $P_w = P_e + P_{sert}$.

Under den forenklede antagelsen om én tilbyder av alle tre teknologier benyttes en total profittmaksimering for å avgjøre tilbudet¹¹, $\pi(x_g, x_s, x_w)$

$$(4) \quad \pi(x_g, x_s, x_w) = p_e x_g + (p_e - t) x_s + (p_e + P_{sert}) x_w - c(x_g, x_s, x_w)$$

I profittfunksjonen er $c(x_g, x_s, x_w)$ er en separabel kostnadsfunksjon, antatt stigende i hvert av argumentene.

4.2.2 Etterspørselsiden

Forbrukerne etterspør både sort og grønn energi, samt energieffektivisering, på en slik måte at nytten, $u(x)$, blir maksimert. Forbrukeren konsumerer $x = x_g + x_s + x_w$, der sammensetningen er avhengig av det relative prisforhold mellom de ulike godene. Hvert av godene bidrar positivt til nyttenivået, og antas å være perfekte substitutter for forbrukerne. I tråd med økonomisk teori vil tilpasningen finne sted der marginal nytte er lik prisen $\frac{\partial u}{\partial x} = p(x)$, der $p(x)$ er forbrukerprisen for det sammensatte godet (se for eksempel Strøm og Vislie (2007) om optimal tilpasning).

4.3 Likevektsløsning ved eksogen kvotepris

For å oppnå reduksjon i energiforbruk utover den reduksjonen markedslikevekten fremprovoserer, må det innføres et sparekrav. I denne modellen innføres et krav om sparing som en andel av kraftforbruket slik at $x_w = \alpha(x_g + x_s)$. I simuleringen vil sparekravet α bli variert fra 0,1 prosent til 30 prosent.

Forbrukerprisen er en funksjon av det sammensatte godet, $p_k = p(x)$ og vil dermed bli en vektet sum av energi- og sertifikatprisen¹², $P_k = P_e + \alpha P_{sert}$, under antagelse om at kjøpskravet binder. Etterspørselsfunksjonen, d blir dermed

¹¹ Dette vil ikke påvirke optimal tilpasning, der marginalkostnad lik pris er kriteriet.

$$(5) \quad x = d(p_e, \alpha p_{sert})$$

der etterspørselen er avtagende i de to argumentene.

I likevekt må etterspørsel og tilbud i de to markedene være like. Etterspørselen etter EE tilsvarende andelen α , mens $(1 - \alpha)$ av etterspørselen er rettet mot energimarkedet.

Likevektsløsningen for de to markedene er dermed

$$(6) \quad \alpha d(p_e, \alpha p_{sert}) = m(p_e, p_{sert})$$

for energieffektiviseringsmarkedet, og

$$(7) \quad (1 - \alpha) d(p_e, \alpha p_{sert}) = g(p_e) + h(p_e, t)$$

for energimarkedet.

Alle prisene i disse markedene vil variere med det eksogent bestemte sparekravet α . Når myndighetene endrer kravet om energieffektiviseringsandelen, vil prisene endres. Ved å derivere likevektsbetingelsen med hensyn på andelskravet α , og omorganisere, får vi

$$(8) \quad (\alpha d' - m') \frac{\partial p_e}{\partial \alpha} + (\alpha^2 d' - m') \frac{\partial p_{sert}}{\partial \alpha} = -d - \alpha d' p_{sert}$$

$$(9) \quad ((1 - \alpha) d' - m') \frac{\partial p_e}{\partial \alpha} + ((1 - \alpha) d' - m') \frac{\partial p_{sert}}{\partial \alpha} = d - (1 - \alpha) d' p_{sert}$$

der parentesene i funksjonsuttrykkene er droppet for forenklingens skyld og der $'$ betyr den deriverte av funksjonen. I det følgende vil jeg presentere løsningene for de deriverte, se vedlegg 10.2 for utregninger.

Energiprisen p_e faller når andelskravet α øker, altså $\frac{\partial p_e}{\partial \alpha} < 0$

Fra løsningen over finner vi

$$(10) \quad \frac{\partial p_e}{\partial \alpha} = \frac{-dd'\alpha + dm' - (1 - \alpha)m'd'p_{sert}}{(1 - \alpha)^2 m'd' + \alpha^2 d'(g' + h') - m(g' + h')} < 0$$

med $d' < 0$ $g' > 0$ $h' > 0$ og $m' > 0$ er telleren i uttrykket over positivt, mens nevneren er negativ. Dermed blir hele uttrykket negativt. Prisen energiprodusenten står ovenfor faller når sparekravet α øker.

¹² $p_k = (1 - \alpha)p_e + \alpha p_w$
 $= (1 - \alpha)p_e + \alpha p_e + \alpha p_{sert}$
 $= p_e + \alpha p_{sert}$

Endring i sertifikatprisen ved endret andelskrav er udefinert

$$(11) \quad \frac{\partial p_{sert}}{\partial \alpha} = \frac{dd' - d(m' + g' + h') + d'p_{sert}((1 - \alpha)m' - \alpha(g' + h'))}{(1 - \alpha)^2 m'd' + \alpha^2 d'(g' + h') - m'(g' + h')}$$

Nevneren er her den samme som i likning 10, og negativ. Telleren er derimot ubestemt. Teller er derimot ubestemt. Det første uttrykket i telleren er negativt som en følge av at $d > 0$ og $d' < 0$. Det andre uttrykket er også negativt som en følge av at d, m, g' og h' alle er > 0 . Det siste uttrykket er ubestemt. Vi ser at dersom

$$(1 - \alpha)m' > \alpha(g' + h') \text{ eller } \frac{m'}{g' + h'} > \frac{\alpha}{1 - \alpha} \text{ vil det siste uttrykket også være negativt.}$$

Altså, dersom forholdet mellom grensekostnadene fra sparing og summen av grensekostnadene for de to tilbudene i energisektoren er større enn forholdet mellom andelene av de to vil sertifikatprisen stige.

Det ubestemte fortegnet på sertifikatprisen uttrykker at det ikke er gitt at økt sparekrav medfører økt sparepris. Sertifikatprisen vil falle dersom den følgende betingelsen er tilfredsstilt $d(d' - (m' + g' + h')) + d'p_{sert}(1 - \alpha)m' < d'p_{sert}\alpha(g' + h')$. Dette vil gi positiv teller, og $\frac{\partial p_{sert}}{\partial \alpha} < 0$.

Endringen i energieffektiviseringsprisen p_w kan være både positiv og negativ

$$0 \geq \frac{\partial p_w}{\partial \alpha} \geq 0 \text{ siden prisendringen her er en kombinasjon av endringen i energiprisen}$$

som er større enn null og endringen i sertifikatprisen som er ubestemt.

$$(12) \quad \frac{\partial p_w}{\partial \alpha} = \frac{\partial p_e}{\partial \alpha} + \frac{\partial p_{sert}}{\partial \alpha}$$

dette gir

$$\frac{\partial p_w}{\partial \alpha} = \frac{1}{|A|} \left[-dd'\alpha + dm' - dd' - (1 - \alpha)m'd'p_{sert} \right. \\ \left. - d(m' + g' + h') + (1 - \alpha)m'd'p_{sert} + d'p_{sert}(\alpha(g' + h')) \right]$$

der $|A|$ er determinanten som angir nevneren i uttrykkene over. Etter forenklinger reduseres dette til

$$(13) \quad \frac{\partial p_w}{\partial \alpha} = \frac{1}{|A|} [-dd'(\alpha + 1) - d(g' + h') + d'p_{sert}(\alpha(g' + h'))]$$

som har ubestemt fortegn. Det første uttrykket er positivt, mens de to siste er negative.

Forbrukerprisen kan også både stige og falle med andelskravet $0 \geq \frac{\partial p_k}{\partial \alpha} \geq 0$

Kjøperprisen er et vektet gjennomsnitt av energiprisen og sertifikatprisen

$$(14) \quad \frac{\partial p_k}{\partial \alpha} = \frac{\partial p_e}{\partial \alpha} + \alpha \frac{\partial p_{sert}}{\partial \alpha} + p_{sert}$$

$$(15) \quad \frac{\partial p_k}{\partial \alpha} = \frac{1}{|A|} \left[(1-\alpha)dm' - (1-\alpha)^2 d'm'p_{sert} - \alpha d(g' + h') - \alpha^2 d'p_{sert}(g' + h') \right]$$

der de to første uttrykkene er positive, det tredje negativt og det fjerde positivt. Totaleffekten er ubestemt. Dersom betingelsen som medfører stigende sertifikatpris holder, vil de to prisendringene trekke i hver sin retning, og fortegnet er derfor ubestemt.

4.4 Likevektsløsning ved endogen kvotepris

Ved endogenisering av kvoteprisen utvides modellen med en likning som beskriver kvotemarkedets dynamikken. Her antas de sorte produsentene å være eneste etterspørere etter kvoter. Etterspørselen er avhengig av prisen på energi og prisen i kvotemarkedet, samt utslippsintensiteten γ . Tilbudet er konstant, gitt av myndighetene, lik \bar{z} .

Den nye modellen er dermed beskrevet ved de tre følgende likningene

$$(6) \quad \alpha d(p_e, \alpha p_{sert}) = m(p_e, p_{sert})$$

$$(7) \quad (1-\alpha)d(p_e, \alpha p_{sert}) = g(p_e) + h(p_e, t)$$

$$(16) \quad \gamma h(p_e, t) = \bar{z}$$

der den første beskriver energimarkedet, den andre beskriver sparemarkedet og den siste beskriver likevektsbetingelsen i kvotemarkedet for utslippstillatelser. Priser, funksjoner og deriverte er som beskrevet over.

Energiprisen p_e faller når andelskravet α øker, det vil si $\frac{\partial p_e}{\partial \alpha} < 0$

I tråd med resultatet ved eksogen kvotepris faller energiprisen med sparekravet,

$$(17) \quad \frac{\partial p_e}{\partial \alpha} = \frac{|A_1|}{|A|} = \frac{(-(1-\alpha)d'm'p_{sert} + m'd - \alpha d'd)}{(m'd'(1-\alpha)^2 - m'g' + \alpha^2 d'g')} < 0$$

Nevneren er her negativ, mens telleren er positiv¹³.

¹³ Determinantene er definert med motsatt fortegn, men de resulterende uttrykkene medfører endring av fortegn for teller og nevner som følge av forenklinger.

Endring i sertifikatprisen ved endret andelskrav er udefinert

$$(18) \quad \frac{\partial p_{sert}}{\partial \alpha} = \frac{|A_2|}{|A|} = \frac{(dd' - d(m' + g') + d'p_{sert}((1 - \alpha)m' - \alpha g'))}{(m'd'(1 - \alpha)^2 - m'g' + \alpha^2 d'g')}$$

Nevneren er negativ, men telleren er ubestemt, dermed er hele uttrykket ubestemt.

Dersom $(1 - \alpha)m' > \alpha g'$, eller $\frac{m'}{g'} > \frac{\alpha}{(1 - \alpha)}$ vil tellerens fortegn være entydig negativt,

og sertifikatprisen stiger med andelskravet. Generelt er det imidlertid uklart om økt andelskrav medfører økt sertifikatpris. Sertifikatprisen vil falle dersom den følgende betingelsen er tilfredsstilt $d(d' - (m' + g')) + d'p_{sert}(1 - \alpha)m' < d'p_{sert}\alpha g'$.

Endringen i energieffektiviseringsprisen p_w kan være både positiv og negativ

da prisendringen består av endringen i energiprisen og sertifikatprisen

$$(14) \quad \frac{\partial p_w}{\partial \alpha} = \frac{\partial p_e}{\partial \alpha} + \frac{\partial p_{sert}}{\partial \alpha}$$

dette gir

$$\frac{\partial p_w}{\partial \alpha} = \frac{1}{|A|} \left[-(1 - \alpha)d'm'p_{sert} + m'd - \alpha d'd \right]$$

der $|A|$ er $(m'd'(1 - \alpha)^2 - m'g' + \alpha^2 d'g')$, og dermed positiv. Etter forenklinger reduseres dette til

$$(19) \quad \frac{\partial p_w}{\partial \alpha} = \frac{1}{|A|} [(1 - \alpha)dd' - d'\alpha g'p_{sert}]$$

som har ubestemt fortegn. Det første uttrykket er negativt, mens det siste er positivt.

Ved redusert sertifikatpris vil total sparepris falle.

Kvoteprisen er avtagende i sparekravet

$$(20) \quad \frac{\partial t}{\partial \alpha} = \frac{|A_3|}{|A|} = \frac{h'_{pe}(dd'\alpha - dm' + (1 - \alpha)d'm'p_{sert})}{h'_t(m'd'(1 - \alpha)^2 - m'g' + \alpha^2 d'g')} < 0$$

der nevneren er positiv, mens telleren er negativ. Dette vil altså si at kvoteprisen vil falle med sparekravet.

Endringen i prisen på grønn energi

De grønne produsentene mottar i denne modellen prisen som oppstår i energimarkedet. Dermed vil prisen på den grønne teknologien avta med kvotekravet ettersom energiprisen faller.

Endringen i prisen på sort energi

Prisendringen de sorte produsentene står overfor er avhengig endringen i energiprisen og kvoteprisen. Disse to prisendringene trekker endringen i nettoprisen i hver sin retning. Prisendringen for den sorte teknologien vil derfor avhenge av hvilke effekt som dominerer, og kan både stige og avta.

Forbrukerprisen kan også både stige og avta med andelskravet $0 \geq \frac{\partial p_k}{\partial \alpha} \geq 0$

Igjen er forbrukerprisen avhengig av endringene i energiprisen og sertifikatprisen.

$$(14) \quad \frac{\partial p_k}{\partial \alpha} = \frac{\partial p_e}{\partial \alpha} + \alpha \frac{\partial p_{sert}}{\partial \alpha} + p_{sert}$$
$$\frac{\partial p_k}{\partial \alpha} = \frac{1}{|A|} \left[-(1-\alpha)d'm'p_{sert} + m'd - \alpha d'd \right. \\ \left. + \alpha(dd' - d(m' + g') + d'p_{sert}((1-\alpha)m' - \alpha g')) \right]$$

som ved forenkling gir

$$(21) \quad \frac{\partial p_k}{\partial \alpha} = \frac{1}{|A|} \left[(1-\alpha)m'd - \alpha^2 d'p_{sert}(g' + m') - d'm'p_{sert} - \alpha dg' \right]$$

Her er de tre første uttrykkene positive, mens det siste er negativt.

For å undersøke pris- og volumendringene vil jeg i kapittel 6 undersøke disse resultatene ved hjelp av en simuleringsmodell. Først vil jeg presentere datamaterialet som brukes i analysen.

5. Datagrunnlag

Simuleringsmodellen tar utgangspunkt i Cobb-Douglas funksjoner, og for å kalibrere modellen er derfor data for elasticitet, priser og kvantum nødvendig. Dette avsnittet presenterer datamaterialet som ligger til grunn for simuleringene.

Gjennomgående i analysen antas det stigende marginalkostnader i produksjonen både i grønn og sort teknologi, samt i produksjonen av energieffektivisering. Tilbudskurven kan variere mellom produsenter, men i denne analysen benyttes én representativ produsent for hver av de to teknologiene. På forbrukersiden legges en etterspørselsfunksjon som er avtagende i prisen til grunn. I utgangspunktet kan man tenke seg mange sluttbrukere av kraft med ulik prisfølsomhet, men her benyttes én representativ forbruker. Forutsetningen om en representativ produsent og en representativ forbruker er ikke avgjørende for analysen i denne oppgaven, men det bidrar til en vesentlig forenkling. Videre antas fravær av markedssvikt, og i likevekt er dermed marginalkostnader i produksjonen lik marginal nytte. Den eneste etterspøreren etter utslippskvoter er den sorte produsenten, og hele den tilgjengelige kvotemengden står dermed til deres disposisjon.

Store deler av datagrunnlaget i denne oppgaven er hentet fra etatsgruppen Klimakur 2020 sitt arbeid, samt en analyse av energieffektivisering (EE) i industrisektoren gjort av Enova og Norsk Industri (Enova & Norsk Industri 2009; Klimakur 2010; Multiconsult 2009; NVE 2010b). Datamaterialet som ligger til grunn for kalibrering av funksjonene gjelder derfor prinsipielt sett for Norge. Til tross for dette er ikke autarkiet som simuleres nedenfor identisk likt med Norge. Årsaken til dette er blant annet at jeg ønsker å se på et land med en større andel sort produksjon enn den vi i dag ser i Norge. Dermed gir modellsimuleringene en illustrasjon på effekter i slike markeder. Det er ikke de kvantitative størrelsene som er av mest interesse i denne analysen, men snarere de kvalitative resultatene. Det er med andre ord retningen på endringen som er mest interessant. Forholdet mellom elasticitetene i de tre markedene er derfor av stor betydning. Ulike kombinasjoner vil bli analysert for å sjekke for robustheten til resultatene.

5.1 Elektrisitetssektoren

I EUs 20-20-20 målsetning skal forventet etterspørsel etter kraft i 2020 reduseres med 20 prosent. Analysen baseres derfor på fremskrevet etterspørsel. NVE fremskriver en etterspørsel etter kraft på 126,95 TWh i Norge i 2020, mens Klimakur 2020 fremskriver det samme forbruket til 125,7 TWh. Veksten i etterspørselen fra dagens nivå er moderat, og ligger på omkring 0,4 prosent (Klimakur 2010; NVE 2010a). Analysen vil basere seg på en etterspørsel på 126 TWh.

Den fremskrevne kraftprisen i Klimakur 2020 ligger på 48 øre per kWh, uten samfunnsøkonomiske tillegg for overføringskostnader (Klimakur 2010), og det er denne kraftprisen simuleringen nedenfor tar utgangspunkt i.

Når det kommer til etterspørsels- og tilbudselasticiteten i kraftsektoren har det blitt foretatt en rekke empiriske studier. Resultatene er varierende som en naturlig følge av metodiske forskjeller mellom studiene. Andersen et al. (2006) presenterer etterspørselselasticitet i det danske energimarkedet som varierer mellom -0,1 og -0,8, med et gjennomsnitt på -0,3. Det amerikanske energidepartementet rapporterte i 2006 om en etterspørselselasticitet på mellom -0,05 og -0,2 (U.S. Department of Energy 2006).

Etterspørselselasticiteten i energimarkedet er ikke nødvendigvis konstant, og å arbeide med den samme elasticiteten gjennom døgn, uke og sesonger reflektere ikke forbrukernes varierende avhengighet av elektrisitet. Empiriske studier finner også at elasticiteten i markedet endres med prisen, og er en økende funksjon av denne (Andersen et al. 2006; Bye & Hansen 2008). Det er også en forskjell mellom elasticiteten avhengig av om en ser på egenpriselasticitet eller krysspriselasticiteten. Alle de overnevnte momentene kan være medvirkende årsak til de store sprikene i estimeringsresultatene.

I analysen undersøkes løsningen for ulike nivå på etterspørselselasticiteter. Det samme gjelder for de øvrige elasticitetene. Bye (2003) argumenterer for en lik tilbudselasticitet i både grønn og sort produksjon på 0,3, men tester følsomheten for ulike elasticitet og kombinasjoner. Simuleringen i denne oppgaven starter opp med en

elastisitetssamband på 0,1 på etterspørselssiden og 0,3 i begge kraftproduksjonsteknologiene.

5.2 Energieffektiviseringssektoren

Under forutsetning om rasjonelle aktører vil energieffektiviseringstiltak som har en kostnad på under 48 øre per kWh i 2020 allerede være innbakt ved priser på dette nivået. Analysen legger til grunn et krav om økning av energieffektiviseringsinvesteringer utover de som allerede er realisert. Det vil si at en 20 prosent økt investering i EE medfører en økning utover de investeringer som er lønnsomme i referansesituasjonen.

Absolutt mengde omsatt EE vil ikke nødvendigvis øke med andelskravet, se diskusjonen av den analytiske modellen (avsnitt 4.3 og 4.3). Dersom total mengde energiforbruk faller tilstrekkelig, kan absoluttmengden energieffektivisering også falle. Endringene i absoluttnivå på EE-investering vil avhenge av både priser og elastisiteter.

Tilbudskurven i energieffektiviseringssektoren er basert på datamateriale hentet fra Enova og Norsk Industri (2009), NVE (2010b) og Multiconsult (2009). Kun tiltak som har pris høyere enn 48 øre er tatt med i beregningen av tilbudskurven. Dersom antagelsen om rasjonelle aktører ikke holder, og lønnsomme tiltak ikke er gjennomført, vil kravet om å utnytte arbitrasjemuligheten prinsipielt medføre en forbedring i forbrukerøkonomien gjennom fall i totalprisen. Da burde en diskutere årsaken til slike imperfeksjoner og hva som skal til for å fjerne disse slik at de fulle potensialene kan realiseres. Dette ser jeg bort fra her.

Det rimeligste ulønnsomme tiltaket i rapporten fra Enova og Norsk Industri (2009) har en oppstartpris på 56 øre per kWh spart. Det vil si at et tilskudd på 8 øre per kWh er nødvendig for å realisere denne sparingen, gitt en kraftpris på 48 øre. Det dyreste tiltaket har en kostnad på 198 øre per kWh, og når dette tiltaket er gjennomført har det samlet blitt investert i 7,4 TWh (akkumulasjon av kapasiteten til hvert av tiltakene under denne kostnaden).

Elastisiteten i sektoren er estimert fra kostnadsdataene beskrevet over. Ved å kalibrere modellen med disse dataene, får vi en elastisitet for sparing på 1,6. For mer detaljert beskrivelse av metode og data, se vedlegg 10.3. Jeg vil gjennomføre simuleringer med den kalibrerte elastisiteten, men også gjennomføre tester for hvor robuste resultatene er. Det vil si at jeg vil undersøke resultatene ved ulike nivå på elastisiteten.

5.3 Karbondioksidutslipp

Utslippsmengden i 2020 vil avhenge av forutsetninger om kraftteterspørselen, sammensetning i produksjonen av energi og transformasjonskoeffisienten for CO₂ utslipp. EnergiLinks klimakalkulator benytter en utslippsintensitet for naturgass på 0,168 kilo CO₂ per kWh produsert, mens kull har en høyere utslippsintensitet, og ligger på 0,356 kilo CO₂ per kWh produsert (EnergiLink 2010). Johnsen et al. (2008) benytter en utslippsintensitet på 0,22 for gass og 0,32 for kull. I denne oppgaven legges i utgangspunktet en utslippskoeffisient på 0,3 til grunn, men simuleringsresultatene vil bli undersøkt for påvirkning fra ulik utslippsintensitet.

Den forventede prisstigningen for CO₂-kvoter frem til 2020 er på godt over hundre prosent, fra rundt 130 kroner høsten 2009 til 330 kroner i 2020. Dette innebærer en økning fra 3 øre per kWh til 9 øre per kWh (Klimakur 2009), gitt en utslippsintensitet på 0,27. Ved hjelp av energikalkulatoren til EnergiLink har jeg regnet ut at den ekvivalente kvoteprisen per kWh for produsenter som benytter naturgass i produksjonen er på 6,130 øre, mens den for kullprodusenter er på 11,748 ved Klimakur sin fremskrevde kvotepris (EnergiLink 2010).

I simuleringen under antagelse om eksogen kvotepris benyttes prisen på 9 øre per kWh, mens utslippet er endogent. I situasjonen med endogen kvotepris vil en utslippsskranke bli innført, mens kvoteprisen blir bestemt i modellen.

5.4 Problemer med dataene

Det er stor usikkerhet knyttet til fremskrevne størrelser, særlig med tanke på uforutsigbar teknologiske fremgang, både i energisektoren, energi-effektiviseringssektoren og karbondioksidmarkedet.

Datamaterialegrunnlaget i energieffektiviseringssektoren har forbedringspotensial. Det finnes langt flere virkemidler for å øke energieffektiviteten enn de som er representert i beregningen av kostnadskurven over. Dessverre er det ikke foretatt like mange kostnadsanalyser av tiltakene. Den estimerte kostnadskurven må ikke tillegges for stor vekt med hensyn på størrelsesorden, men bør heller leses som illustrerende for sektoren. For mer om energieffektiviseringspotensialet, se rapporter utarbeidet av Havskjold et al. (2009) eller Bellona og Siemens (2007).

Som en følge av at dataene brukt i denne oppgaven i hovedsak gjelder for Norge vil den kvantitative analysen se annerledes ut med andre lands data, eller annen data for Norge enn den lagt til grunn her. Noen europeiske land har allerede mer effektive systemer enn andre, og dermed høyere kostnader knyttet til ytterligere effektivisering enn andre. Dermed vil innføringen av sparekrav kunne slå kvantumsmessig annerledes ut for de ulike europeiske landene. Teknologien flyter ikke helt fritt over grenser. Noen av disse forskjellene illustreres indirekte gjennom de følsomhetsanalysene som gjøres omkring elastisitetene.

6. Simuleringsresultater

De analytiske resultatene i kapittel 4 ga ikke entydige resultat for prisendringene ved endret sparekrav. For å undersøke effektene av sparekravet har jeg derfor gjennomført en simulering av et konstruert autarki. I dette kapitlet vil jeg presentere resultatene fra denne simuleringsmodellen. Simuleringene baserer seg på den partielle likevektsmodellen beskrevet i kapittel 4. For en gjennomgang av den kalibrerte modellen som brukes i analysen se vedlegg 10.4.

For å gjennomføre analysen har jeg benyttet modelleringsverktøyet *The General Algebraic Modeling System* (GAMS)¹⁴. GAMS-modellen som benyttes er beskrevet i vedlegg 10.5. Alle de følgende figurene er basert på resultater produsert av simuleringene i GAMS.

Analysen tar kun for seg de tre isolerte markedene, og ser dermed bort fra *rebound* effekter fra endringer i andre markeder. Annen politikk enn kvoteplikten og krav om sparing, eller andre eksterne sjokk som kan rokke ved likevekten, er ikke en del av analysen.

I utgangspunktet har jeg satt den antatte tilbudselasticiteten i kraftmarkedet på 0,3 for både den sorte og den grønne produsenten og 1,6 for produsenten i sparemarkedet, se kapittel 5 for begrunnelsene for dette. Forbrukernes etterspørsel er modellert som etterspørselen etter et kombinasjonsgode bestående av kraft og sparing, med en antatt etterspørselselasticitet på -0,1. Omfanget av kraftmarkedet er satt til 126 TWh (tilsvarende om lag det norske elektrisitetsmarkedet), og i utgangspunktet antas det at de to kraftprodusentene deler markedet likt mellom seg. Årsaken til denne delingen av markedet er ikke kartellvirksomhet eller annet samarbeid, men en følge av antagelse om lik kostnadsstruktur i de to sektorene uttrykt gjennom lik elasticitet, lik konstantledd og lik nettoppris. Når annet ikke er oppgitt vil disse antagelsene ligge til grunn for simuleringen.

¹⁴ GAMS er et modelleringsverktøy for matematisk programmering og optimering. Se for eksempel Rutherford (2002).

Gjennom simuleringene ønsker jeg å belyse pris- og volumeffektene som oppstår i de tre markedene ved innføringen av økte energieffektiviseringskrav. Kapitlet er organisert i tre deler, der den første delen tar for seg endringene ved en eksogent gitt kvotepris på utslipp. Dette gjenspeiler et marked der de sorte produsentenes etterspørsel etter kvoter utgjør en liten andel av den totale etterspørselen i kvotemarkedet. Da vil redusert sort produksjon ha lite påvirkning på markedsklareringsprisen, og forutsetningen om gitt kvotepris er plausibel. Den neste delen analyserer en situasjon der etterspørselen etter kvoter fra de sorte produsentene utgjør en stor andel av kvotemarkedet. Dermed vil endringer i produksjonsvolum av sort kraft påvirke kvoteprisen, som derfor behandles som endogen. Den tredje og siste delen presenterer simuleringsresultater ved antagelse om endogen kvotepris og to sorte produsenter med ulik utslippsintensitet.

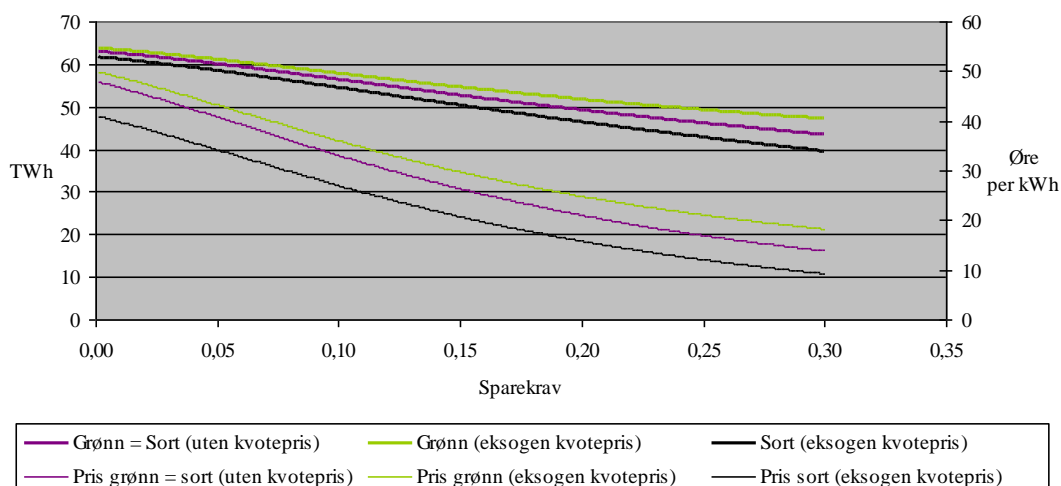
6.1 Eksogen kvotepris

I dette avsnittet presenteres den endrede tilpasningen i kraft-, spare- og kvotemarkedet ved økt sparekrav når kvoteprisen antas eksogent gitt.

Pris- og volumeffekter i kraftmarkedet

Både pris og volum er forventet å falle når sparekravet innføres; sparingen reduserer etterspørselen etter energi, og i likevekt er tilpasningen med lavere pris konsistent med lavere volum når tilbudet er stigende i pris. De analytiske resultatene verifiserte hypotesen om fallende energipris ved økt energieffektiviseringskrav. Simuleringen bekrefter også dette resultatet, samt hypotesen om redusert omsatt kraft. I figur 11 er prisene produsentene mottar med og uten eksogen kvotepris presentert.

I figuren er sparekravet målt langs x-aksen, den primære y-aksen aksene angir kraftkvantum omsatt i markedet (TWh), mens den sekundære y-aksen angir kraftprisen i øre per kWh, og prisene måles langs denne.



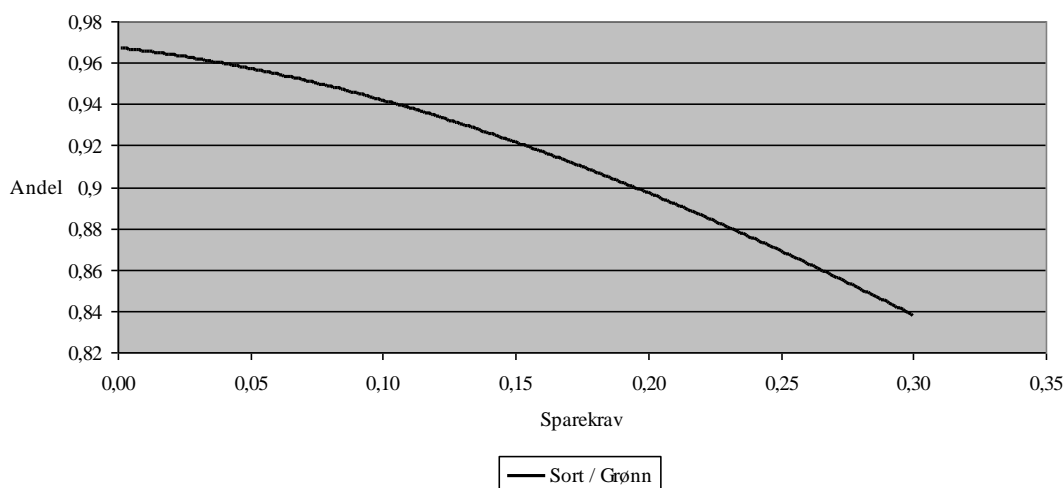
Figur 11 Utvikling i kraftpris og -produksjon med uten eksogen kvotepris

De lilla kurvene representerer utviklingen i et marked uten utslippsrestriksjoner, og gir dermed lik nettopris i de to teknologiene. Når sparekravet øker faller mengden energi etterspurt av forbrukerne, og med den reduserte etterspørselen faller prisene på kraft. Uten utslippsrestriksjon og med identiske tilbudskurver for de to produsentene vil den resulterende tilpasningen være lik for begge teknologier.

Dersom den sorte produsenten derimot må betale en eksogen gitt avgift per enhet CO₂ de slipper ut, vil tilpasningen endres. Det er her antatt en eksogen kvotepris tilsvarende 9 øre per kWh. Dette medfører en endring i utgangspunktsdelingen av markedet fra 50/50 til 51/49 i grønn teknologi sin favør, jf de grønne og sorte kurvene i figur 11. Kvoteprisen oppleves som en subsidie for den grønne produsenten (avstanden fra den grønne prislinjen til den lilla prislinjen), mens den sorte produsenten får redusert nettopris (der avstanden fra den grønne linjen til den sorte angir kvoteprisen).

Ved økt energieffektiviseringskrav forverres det relative forholdet for den sorte produsenten, da mengden sort energi reduseres mer enn grønn energi. Årsaken til endringen i det relative forholdet mellom teknologiene, er at ved lavere kraftpris utgjør den eksogene skatten en stadig større del av nettoprisen for den sorte produsenten. Dette fører til at kraftprisendringen i kombinasjon med den eksogene kvoteprisen oppleves som en relativ økning i skatten for de sorte produsentene.

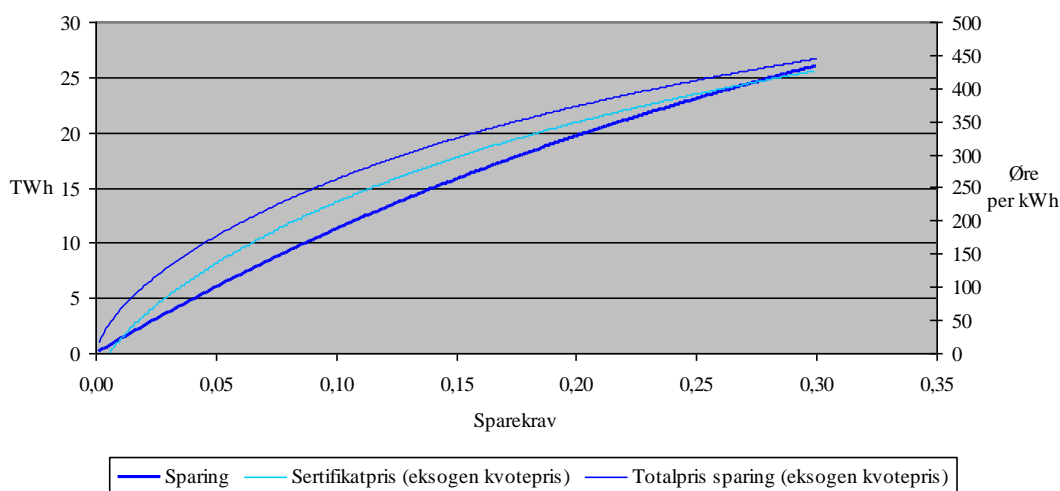
Kvantumsendringene i figur 11 ser lineære ut, men er svakt konvekse. Prisutviklingen er også konveks, eller fallende i avtagende tempo. Utviklingen i det relative forholdet mellom de to teknologiene ved økt sparekrav er konkav, eller fallende i økende tempo, se figur 12.



Figur 12 Utviklingen i sammensetning av energibærere ved eksogen kvotepris

Pris- og volumeffekter i sparemarkedet

Kravet til sparing innføres i denne simuleringen som en prosentandel av kraftforbruket, og ikke som en absolutt økning i sparekonsum. Omsatt sparing er derfor avhengig av størrelsen på sparekravet og det totale kraftforbruket, som faller med sparekravet. Energieffektiviseringskvantumet vil øke med andelskravet, under forutsetning om at nedgangen i kraftforbruket ikke er dominerende. I motsatt fall vil absolutt sparing kunne falle. Resultatet fra simuleringen med eksogen kvotepris på 9 øre per kWh er presentert i figur 13.

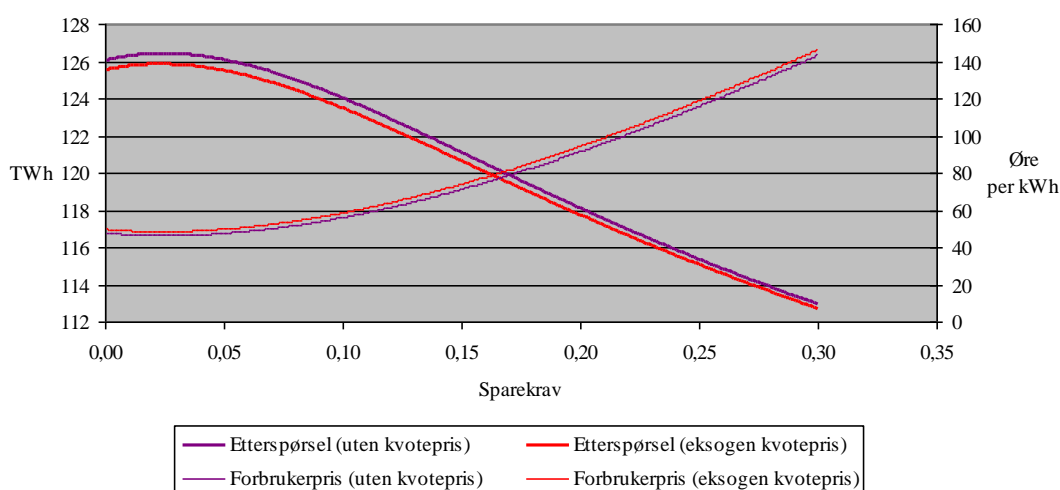


Figur 13 Utvikling i sertifikatpris, total sparepris og sparevolum ved eksogen kvotepris

Med tallene som her ligger til grunn, stiger sparingen med sparekravet for alle nivåer på sparekravet. Etter hvert som reduksjonen i energiprisen avtar avtar også veksten i sertifikatprisen.

Pris- og volumeffekter for forbrukerne

Med avtagende energipris og økende sertifikatpris er endringen i total konsumentpris i utgangspunktet ubestemt, slik som den analytiske delen viste. De to priskomponentene i forbrukerprisen trekker her i hver sin retning. Av figur 14 ser vi at ved lave sparekrav er prisfallet fra kraftmarkedet større enn prisøkningen via sparemarkedet. Etter hvert som andelskravet øker dominerer prisøkningen fra sparemarkedet over prisreduksjonen i kraftmarkedet, $\Delta p_k = (1 - \alpha)\Delta p_e + \alpha\Delta p_w$. Ved lave sparekrav øker altså forbruket av energikrevende goder (kraft pluss sparing), for så å avta med den økende totalprisen per kWh.



Figur 14 Utvikling for forbrukerne ved eksogen kvotepris

Pris- og volumeffekter i karbondioksidmarkedet

Karbondioksidmarkedet er antatt uendret under dette "eksogen kvotepris regimet". Til tross for redusert omsatt sort energi og redusert etterspørsel etter utslippskvoter, vil ikke prisen på kvoter falle, per forutsetning. Dermed vil lønnsomheten i sort energi falle relativt til lønnsomheten i grønn teknologi når kraftprisen faller. Selv om totalforbruket (kraft pluss sparing) øker for lave sparekrav faller forbruket av kraft, og reduksjonen er størst for den sorte teknologien. Totale utslipp fra kraftsektoren går ned.

I neste avsnitt vil vi se på en likevektsløsning i kvotemarkedet der prisen på kvoter endres ved redusert sort produksjon.

6.2 Endogen kvotepris

Her antar vi at den sorte kraftprodusenten er den eneste aktøren på kvotemarkedet, og vi antar eksogene utslipp, mens kvoteprisen antas endogen.

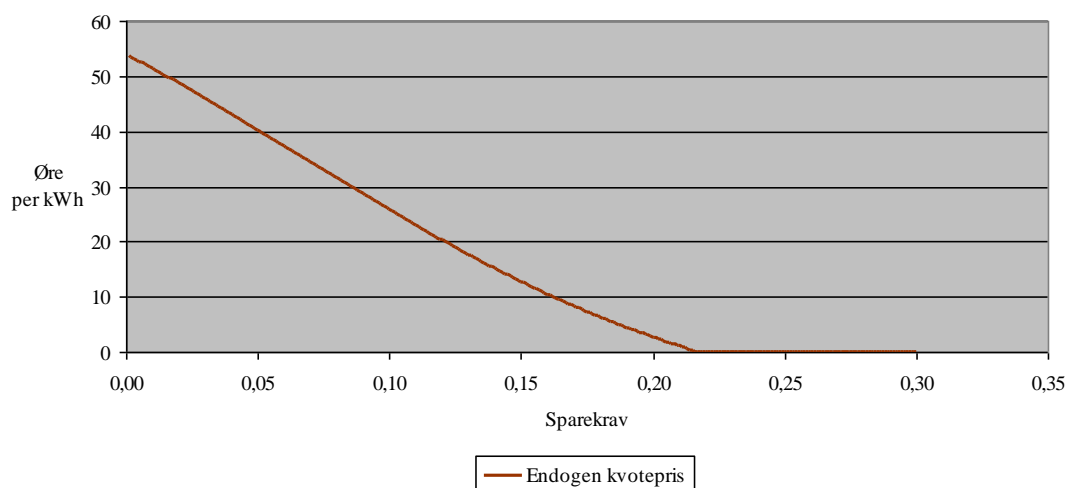
I den analytiske løsningen ved endogen kvotepris fant vi avtagende energipris og avtagende kvotepris. Dette medfører en entydig reduksjon i prisen til den grønne produsenten, mens prisendringen til den sorte produsenten er uklar. Endringen i det relative prisforhold mellom de to teknologiene er derimot klar, og økende i sort energi sin favør. Endringen i sertifikatprisen i sparemarkedet var uklar, det samme gjelder endring i totalpris for spareprodusenten og endringen i total forbrukerpris. I dette avsnittet vil først endringen i kvotemarkedet blir presentert, deretter presenteres de øvrige pris- og volumeffektene.

Pris- og volumeffekter i karbondioksidmarkedet

Til sammenligning med situasjonen ved eksogen kvotepris faller kvoteprisen som en følge av endret etterspørsel fra den sorte sektoren. Når omfanget av sort produksjon faller, faller også utslippet, og dermed etterspørsel etter utslippskvoter. I simuleringen med endogen kvotepris tok jeg utgangspunkt i autarkiet beskrevet innledningsvis. Ved en deling av markedet produserer den sorte produsenten 63 TWh, som med en utslippsintensitet på 0,3 medfører et utslipp på 18,8 millioner tonn CO₂.

Dersom myndighetene setter et tak på dette utslippet tilsvarende 80 prosent, eller 20 prosent reduksjon, vil det tillatte utslippet falle til 15 millioner tonn CO₂. Denne beskrankningen, ved uendret utslippsintensiteten, gir en maksimal mengde sort energi på 50,2 TWh produsert. Den tilhørende kvoteprisen blir da 54 øre per kWh mot 9 øre per kWh i tilfellet med gitt kvotepris og endogene utslipp. For å imøtekomme likevektsbetingelsen i kvotemarkedet må den sorte produksjonen være upåvirket av sparekravet, og dermed konstant lik 50,2 TWh.

Figur 15 illustrerer endringen i kvoteprisen når sparekravet øker, i kombinasjon med en initialt bindende utslippsskranke. Energimarkedets omfang er i utgangspunktet redusert til 121 TWh, med en tilhørende kvotepris på 54 øre per kWh. Etter hvert som størrelsen på kraftmarkedet reduseres faller kvoteprisen. I denne simuleringen blir markedet til slutt så lite at utslippstaket ikke lenger medfører en bindende skranke for den sorte produsenten, og kvoteverdien faller til null ved et sparekrav i overkant av 20 prosent.



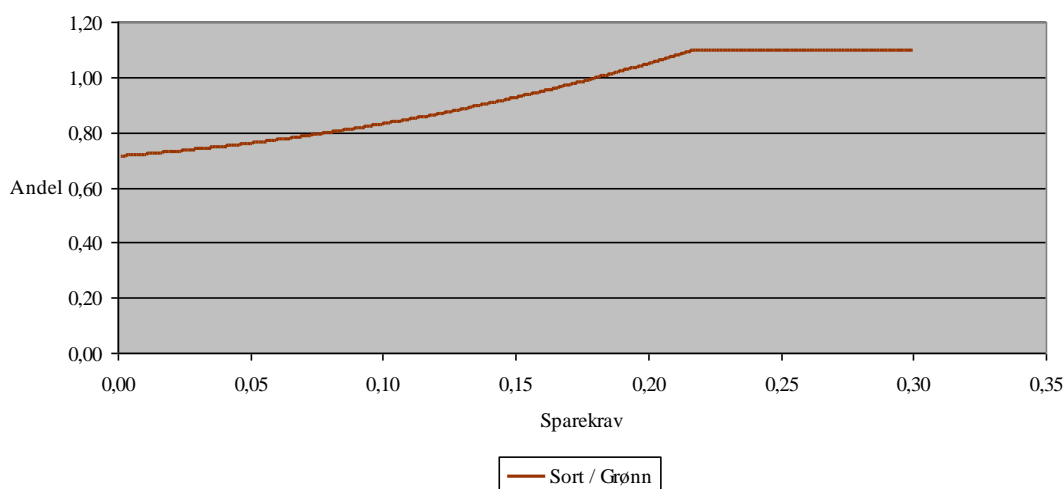
Figur 15 Endogen kvoteprisutvikling

Pris- og volumeffekter i kraftmarkedet

Også modellsimulering ved endogen kvotepris bekrefter hypotesen, og det analytiske resultatet om avtagende kraftpris ved økt sparekrav. Ettersom betingelsen om uendret utslipp medfører uendret sort produksjon vil det reduserte kraftforbruket kun medføre redusert grønn produksjon. Hele sparekravet må oppfylles gjennom redusert grønn produksjon. Kvoteprisen faller slik at den fullstendig oppveier den fallende kraftprisen i markedet, og lønnsomheten for den sorte produsenten opprettholdes.

Når kvoteprisen blir null blir resultatene vanskelige å tolke. Årsaken er ikke-negativitetsskranken satt på kvoteprisen, ettersom betaling for utslipp er utenkelig. Når kvoteprisen er null kan ikke kraftprisen reduseres ytterligere uten å bryte med kvotemarkedslikevekten. Dette medfører at økt sparekrav ved uendret kraftmengde kombinert med en etterspørsel som er avtagende i pris, vil gå utover sparekvantum så lenge sparing er mer kostbart enn kraft. Med dataene som ligger til grunn faller

kvoteprisen til null når sparekravet er på 20,2 prosent. I noen av de følgende figurene vil kun resultater frem til dette andelsnivået være inkludert.



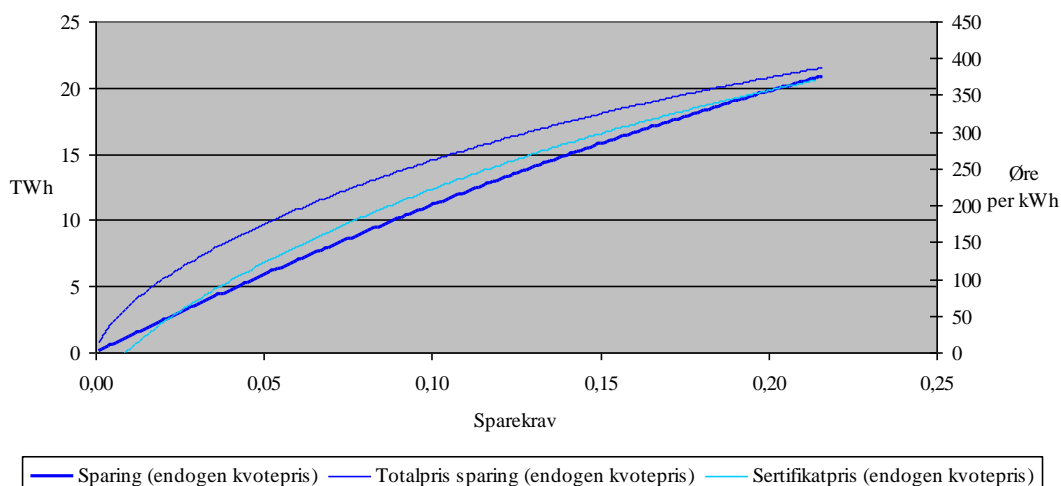
Figur 16 Utviklingen sammensetning av energibærere ved endogen kvotepris

Før utslippstaket ble innført delte de to produksjonssektorene markedet seg imellom. Ved innføringen av kvotekravet oppstod det en endogen kvotepris, som reduserte nettoprisen til de sorte produsenten. Dermed utgjorde den sorte produksjonen en mindre andel av det totale markedet enn den grønne. Etter hvert som sparekravet øker og kraftmarkedet krymper, faller kvoteprisen. Ved økende sparekrav forbedrer situasjonen seg for den sorte produsenten, sammenlignet med de grønne, som illustrert i figur 16. Med en kvotepris på null deler produsentene igjen markedet seg imellom, under de antagelsene som her ligger til grunn.

Størrelsesordenen på pris- og volumsendringene er ikke av interesse, da økonomien som beskrives er en konstruert økonomi, og ikke representerer et spesifikt land. Det interessante i funnene beskrevet over er retningen på utviklingen i markedet. Situasjonen for den sorte produsenten forbedres med sparekravet.

Pris- og volumeffekter i sparemarkedet

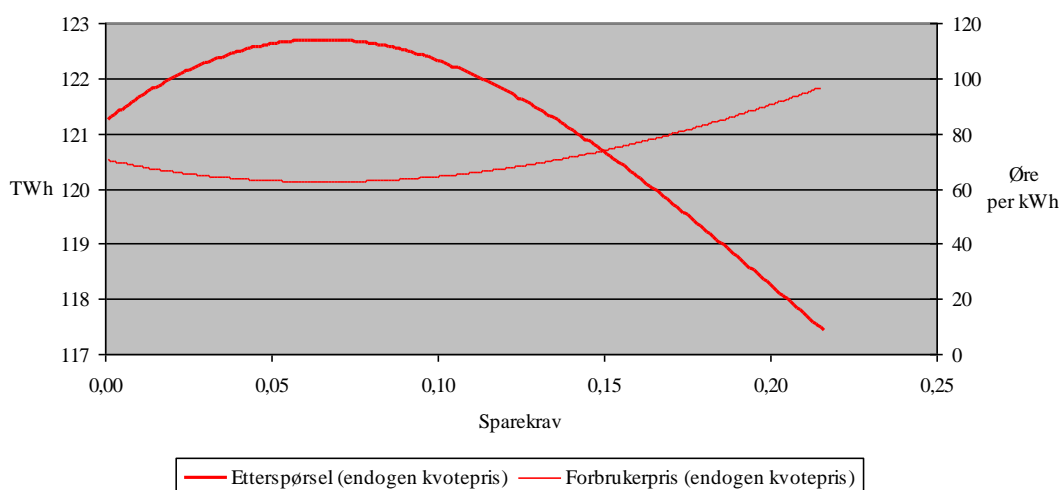
Under antagelse om endogen kvotepris, er retningen på endringene i sparemarkedet svært sammenlignbare med endringene ved eksogen kvotepris. Resultater for sparekrav større enn 20 prosent ikke er inkludert.



Figur 17 Endret sparepris og kvantum ved økt sparekrav

Pris- og volumeffekter for forbrukerne

Også i den analytiske løsningen med endogen kvotepris er effekten på total forbrukerpris fra sparekravet uavklart. Under antagelse om endogen kvotepris dominerer priseffekten fra kraftmarkedet i større grad enn ved eksogen kvotepris. Årsaken til dette er at kraftprisen må falle relativt mer for å oppnå den nødvendige kvantumsreduksjon ved redusert etterspørsel. Dette skyldes at den sorte kraftproduksjonen opprettholdes som følge av den fallende kvoteprisen, og den grønne produsenten må gjennomføre all kvantumsreduksjonen.



Figur 18 Forbrukertilpasning ved ulike andelskrav

Dersom den sorte teknologien som benyttes i produksjon av kraften utgjør en tilstrekkelig stor del av kvotemarkedet, og reduksjonen i deres utslipp er stort nok til å påvirke prisen, vil innføringen av et sparekrav potensielt medføre en relativ

forbedring for de sorte produsentene. Dette resultatet er i tråd med Böhringer og Rosendahls (2009) funn. I deres artikkel analyserer de en situasjon med flere produsenter, og ulik utslippsintensitet. I neste avsnitt ønsker jeg å undersøke en lignende antagelse med det datamateriale og metode som ligger til grunn i denne oppgaven.

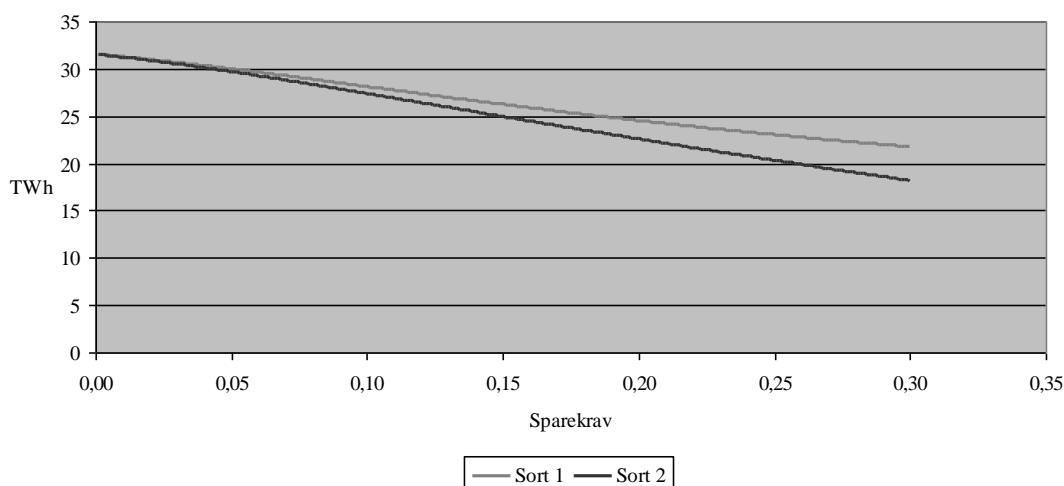
6.3 Ulik utslippsintensitet

Når Böhringer og Rosendahl (2009) finner at innføringen av grønne sertifikater kommer de mest skitne produsenten til gode argumenterer de som følger

(...) politikk som øker andelen av grønn kraft reduserer, som en førsteordenseffekt, lønnsomheten til de sorte kraftprodusentene, og reduserer dermed deres produksjon. Men, siden totalt utslipp er gitt av den sorte kvoten, faller prisen på utslipp, og dette kommer de mest utslippsintensive teknologiene mest til gode. Ettersom noen produsenter må øke produksjonen gitt konstant totalt utslipp, er sluttresultatet høyere produksjon fra den mest skitne teknologien. (side 4)

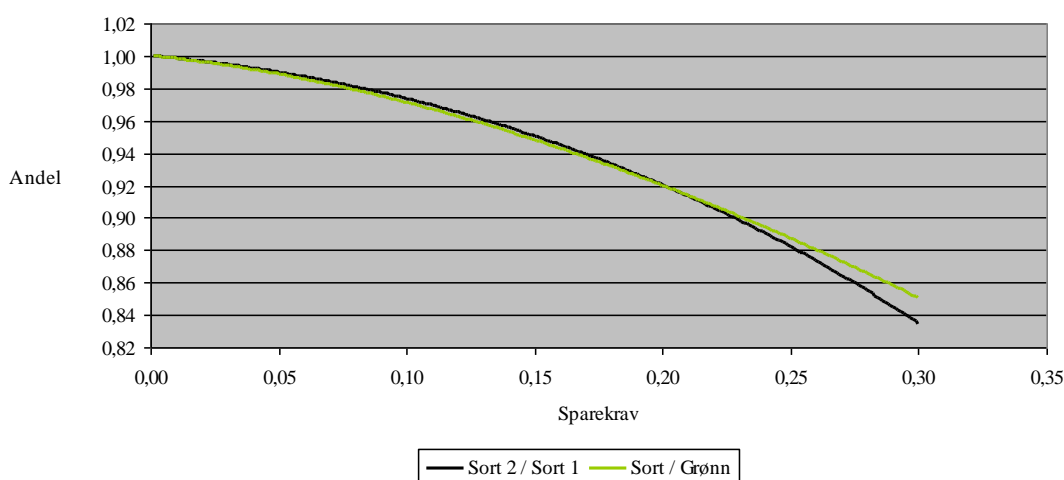
I det følgende har jeg simulert en økonomi med to sorte produsenter. De to produsentene antas å ha lik tilbudselasticitet, men ulik utslippsintensitet. Produsent 1, eller Sort 1, antas å ha en utslippsintensitet på 0,17, mens produsent Sort 2 antas å ha en utslippsintensitet på 0,37. Med en eksogent gitt kvotepris på 330 kroner per tonn CO₂ vil dette medføre ulik eksogen kvotepris for de to produsentene, på henholdsvis 5,62 øre per kWh og 12,22 øre per kWh. Også her vil jeg sammenligne effektene av sparekravet under antagelse om både eksogen og endogen kvotepris.

I figur 19 har jeg forutsatt at de to sorte produsentene deler det halve kraftmarkedet seg imellom, og produserer ¼ hver av den totale mengden omsatt kraft. Ved eksogen kvotepris vil den mest utslippsintensive produsenten redusere sin produksjon mest når sparekravet øker, siden denne får den relativt sett største forverringen i lønnsomhet når kraftprisen faller. I likevekt tilpasser de to produsentene seg til en stadig lavere kraftpris enn i utgangspunktet, mens kvoteprisen er fast.



Figur 19 Den mest utslippsintensive produsenten reduserer mest ved eksogen kvotepris

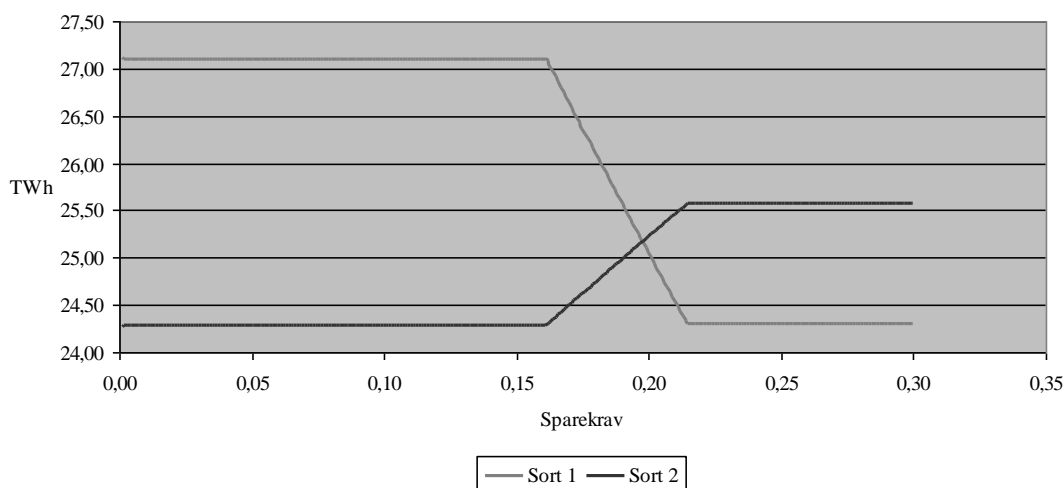
Økt energisparekrav gir også en relativ forverring av lønnsomheten til de mest skitne aktørene av samme grunn. Ved redusert energimarkedsomfang faller andelen av den mest skitne sorte energien mer enn den mindre skitne. Sammenlignet med den grønne teknologien utgjør den sorte teknologien en stadig mindre del av det totale markedet, slik som figur 20 illustrerer.



Figur 20 Utviklingen i sammensetningen av energibærere ved eksogen kvotepris

Ved endogen kvotepris er derimot bildet et ganske annet. I det følgende har jeg antatt samme utslippsintensitet som over, og de samme elastisitetene. Med utgangspunkt i den totale utslippsmengden realisert uten sparekrav har jeg innført et utslippskrav tilsvarende en reduksjon på 20 prosent. Som en følge av ulik utslippsintensitet blir kvotepris per kWh ulik, henholdsvis 5,62 øre per kWh og 12,22 øre per kWh. Til disse kvoteprisene, og med skranken på totalt utslipp, er økonomien uten sparekrav i likevekt når den grønne sektoren utgjør 58 prosent og de resterende 42 prosentene er

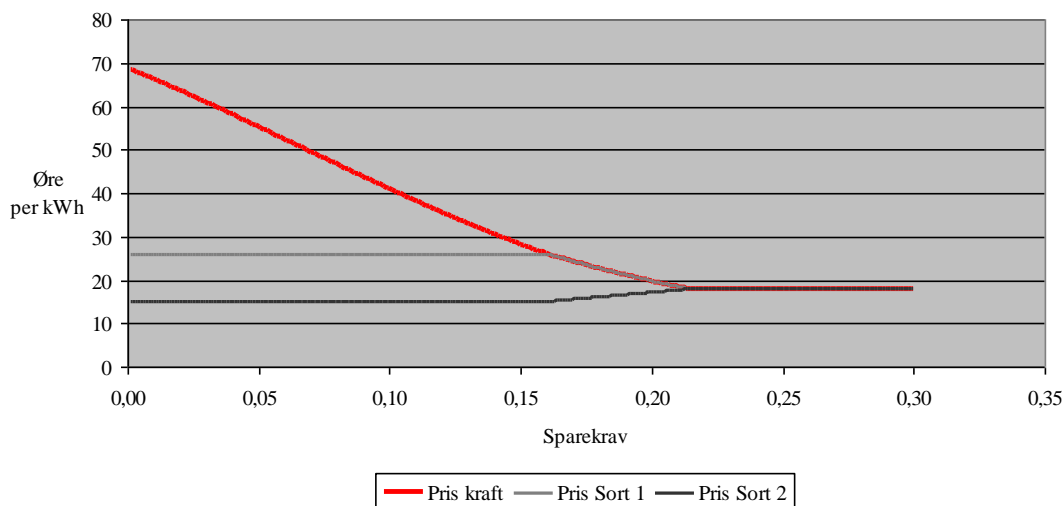
fordelt mellom produsent Sort 1 og 2, med henholdsvis 22 og 20 prosent. I denne simuleringen er det kalibrerte konstantleddet ulikt mellom produsentene, som medfører ulikt nivå på produksjonen ved lik nettoppris. Disse relativforholdene endres med økende sparekrav.



Figur 21 Endret sammensetning av sort produksjon

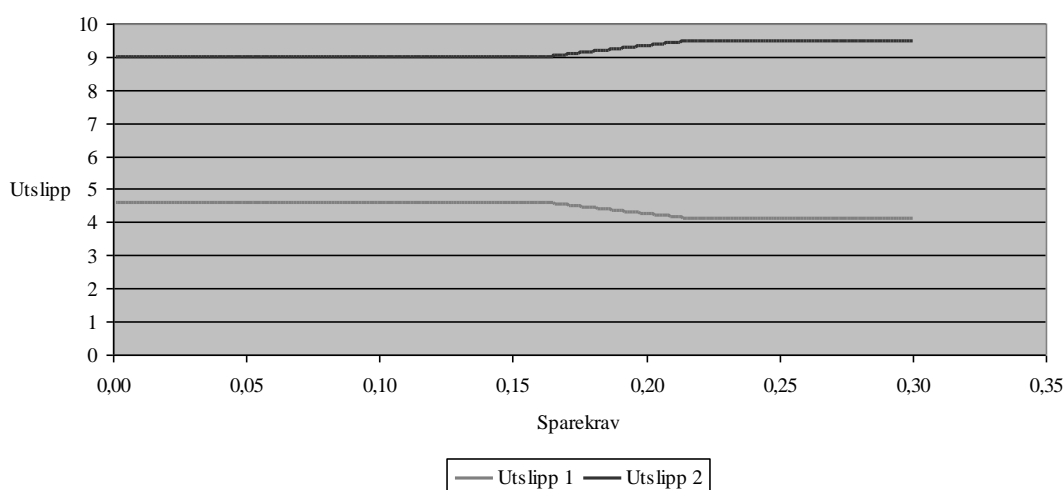
I figur 21 ser vi at ved et andelskrav på omkring 16 prosent begynner den minst skitne produksjonen å falle. Samtidig starter energi produsert av den mest skitne produsenten å stige. Forklaringen på dette er at Sort 1 har en relativt lavere utgangspunktsavgift enn Sort 2 ettersom kvoteprisen er lik for de to, mens utslippsintensiteten er ulik. Som en følge av dette vil den avtagende energiprisen dominere over kvoteprisfallet på et tidligere tidspunkt for Sort 1 enn for Sort 2. Når Sort 1 dermed reduserer produksjonen og utslippet vil Sort 2, som har høyere betalingsvillighet for utslippskvotene, kjøpe opp kvotene som frigis. Dermed kan Sort 2 øke produksjonen helt frem til kvoteprisen faller til null, og markedet stabiliserer seg.

I figur 22 ser vi prisutviklingen for de ulike produsentene. Den røde linjen illustrerer kraftprisen, og det er denne prisen de grønne produsentene mottar. Her ser vi at idet Sort 1 starter produksjonsreduksjonen opplever Sort 2 en økt nettoppris, samtidig som de øvrige produsentene opplever prisreduksjon. Redusert kvoteetterspørsel fra Sort 1 gir lavere kvotepris og reduserte kostnader for Sort 2.



Figur 22 Nettopris ved økt andelskrav og to sorte produsenter

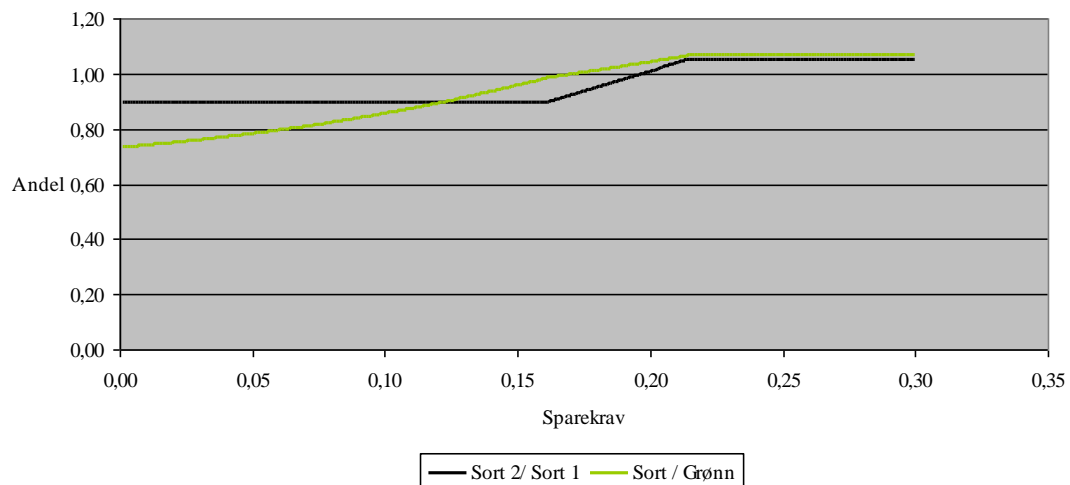
Utslippsendringene er som følger



Figur 23 Skift i utslippskilde ved økt andelskrav

Det første knekkpunktet oppstår i det punktet der kraftprisfallet starter å spise opp den forbedrede situasjonen fallet i kvoteprisen medfører. For den minst utslippsintensive produsenten oppstår dette skiftet tidligst. Når Sort 1 starter å redusere sin produksjon i takt med prisfallet øker den mest skitne produsenten sin produksjon, slik at totalt utslipp forblir uendret.

Utvikling i forholdene mellom de to sorte og den sorte og den grønne sektoren er nå, i motsetning til situasjonen ved eksogen kvotepris, til fordel for den mest skitne teknologien, se figur 24.



Figur 24 Utviklingen i sammensetningen av energibærere ved endogen kvotepris

Dette betyr at når økonomien som innfører sparekravet er stor nok til å påvirke kvoteprisen, vil den mest skitne komme best ut. Er kvoteprisen derimot som eksogen å regne vil den mest skitne komme dårligst ut. I begge situasjoner er totalt utslipp upåvirket av sparekravet, kun sammensetningen av energibærer endres.

Simuleringsresultatene gir støtte til hypotesen fremsatt innledningsvis. For å undersøke robustheten i resultatene over har jeg gjennomført en sensitivitetsanalyse, og i det neste kapitlet vil funn fra disse simuleringene bli presentert.

7. Diskusjon

Diskusjonen er delt inn i tre underavsnitt, der det første diskuterer simuleringsresultatene med utgangspunkt i en sensitivitetsanalyse. Deretter vil problemstilling og hypotese diskuteres i lys av sensitivitetsanalysen. Den siste delen av kapittelet består av en rask gjennomgang av de mest fundamentale forenklingene i modelleringen.

7.1 Sensitivitetsanalyse

Hovedproblemstilling i denne oppgaven er; *Hvordan endres tilpasningen i kraftmarkedet ved innføringen av energieffektiviseringskrav? Hvilke pris- og volumeffekter vil oppstå i kraftmarkedet, sparemarkedet og kvotemarkedet som følge av en slik politikk?* Den analytiske tilnærmingen til problemet gav ikke et klart svar på problemstillingen, og en simulering var derfor nødvendig. Gjennom simuleringen forsøkte jeg å besvare problemstillingen, samt verifisere eller avvise hypotesen fremsatt.

Simuleringen i kapittel 6 ble gjennomført under antagelser om elastisitet på -0,1 0,3 og 1,6 for henholdsvis forbrukerne, begge kraftprodusentene og spareprodusenten. I det følgende vil jeg diskutere hvor robuste simuleringsresultatene er for endringer i det empiriske datagrunnlaget, med hovedfokus på elastisitetene. Jeg har foretatt en sensitivitetsanalyse med ulike elastisitetskombinasjoner, og vil se nærmere på resultatene ved følgende kombinasjoner:

Tabell 1 Ulike elastisitetskombinasjoner benyttet i sensitivitetsanalysen

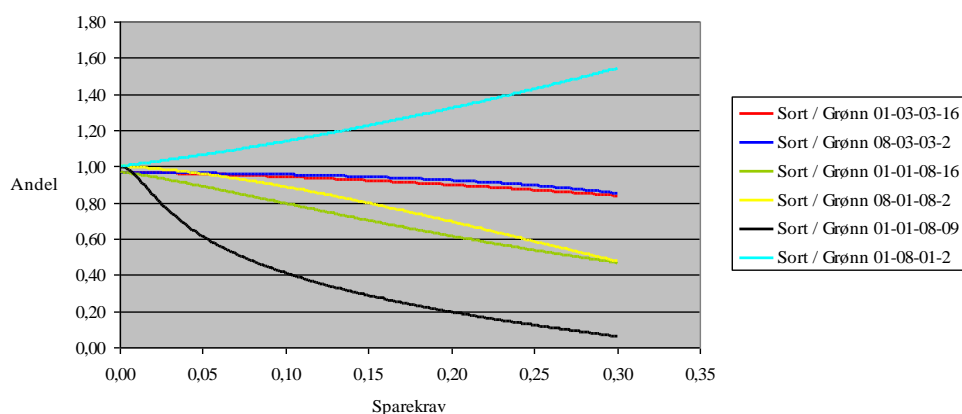
Alternativ	Etterspørsels- elastisitet	Tilbuds- elastisitet Grønn	Tilbuds- elastisitet Sort	Tilbuds- elastisitet Sparing
01-03-03-16	- 0,1	0,3	0,3	1,6
08-03-03-2	- 0,8	0,3	0,3	2,0
01-01-08-16	- 0,1	0,1	0,8	1,6
08-01-08-2	- 0,8	0,1	0,8	2,0
01-08-01-2	- 0,1	0,8	0,1	2,0
01-01-08-09	- 0,1	0,1	0,8	0,9

Organiseringen av dette avsnittet tar utgangspunkt i den rekkefølgen resultatene fra simuleringen ble presentert over, og tar først for seg resultatene ved eksogen kvotepris og deretter ved endogen kvotepris. De grafiske resultatene for alle pris- og volumeffektene er å finne i vedlegg 10.6. Dette vedlegget er lagt opp i samme rekkefølge som diskusjonskapittelet, og i tillegg diskuteres momenter som er litt på siden av hoveddiskusjonen.

7.1.1 Sensitivitetsanalyse av pris- og volumeffekter ved eksogen kvotepris

Både de analytiske resultatene, simuleringsresultatene og sensitivitetsanalysen bekrefter hypotesen om avtagende pris og volum i kraftsektoren ved økt sparekrav. Konklusjonen om avtagende lønnsomhet i kraftsektoren ved innføring av energieffektiviseringskrav kombinert med en eksogen kvotepris, er dermed robust (se vedlegg 10.6).

Den avtagende kraftprisen i kombinasjon med uendret kvotepris oppleves som en relativ økning i kvoteprisen for den sorte produsenten, og forholdet mellom nettoprisen for den sorte og den grønne teknologien, er dermed avtagende. Dette betyr ikke nødvendigvis at det er de sorte produsentene som reduserer produksjonen mest. Hvilken sektor som reduserer mest er avhengig av forholdet mellom elastisitetene i kraftsektoren. Av figur 25 ser vi at når tilbudselasticiteten er høyere i den grønne sektoren, vil størsteparten av reduksjonen finne sted der, til tross for en relativt større reduksjon i nettoprisen i den sorte sektoren enn den grønne (se vedlegg 10.6.1). Dermed er ikke resultatet med relativt størst reduksjon i den sorte sektoren ved eksogen kvotepris et robust resultat, til tross for at endringen i relativ lønnsomhet er robust.

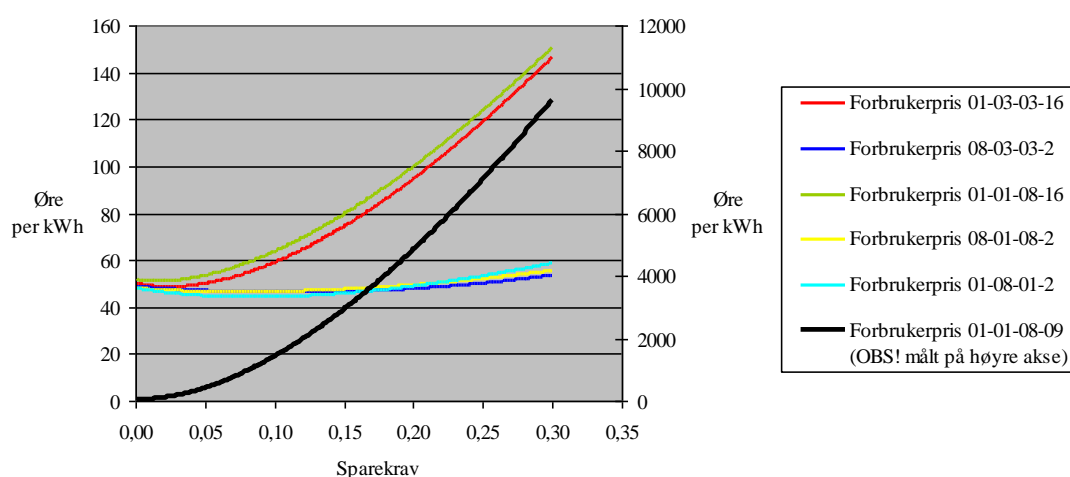


Figur 25 Sensitivitetsanalyse av sammensetning av energibærere ved eksogen kvotepris

Vi ser også at konkavitet eller konveksetet avhenger av forholdet mellom elastisitetene.

Etterspørselen etter sparing er avhengig av kraftetterspørselen, ettersom sparekravet er innført som en andel av kraftforbruket, $x_w = \alpha(x_s + x_g)$. Endringen i pris og volum i sparemarkedet er derfor avhengig av forholdet mellom kraftforbruket og størrelsen på andelskravet. Dersom nedgangen i kraftforbruket dominerer over økningen i andelskravet, vil sparekvantum falle. Ingen av elastisitetskombinasjonene fremprovoserte et slikt resultat, til tross for at dette er en teoretisk mulighet, se kapittel 4.

For forbrukerne er utviklingen i totalprisen per enhet kWh avhengig av forholdet mellom prisfallet i kraftmarkedet og prisøkningen via sparemarkedet, se figur 26. Så lenge prisfallet dominerer vil etterspørselen øke, men så snart sparemarkedsprisen dominerer, øker totalprisen og omsatt kvantum faller. Når skiftet fra redusert totalpris til økt totalpris finner sted, avhenger i stor grad av utviklingen i spareprisen. Sparekravet er jevnt økende i analysen, og når spareprisen øker raskt vil selv lave sparekrav medføre sterk prisvekst. Totalprisen øker til slutt for alle elastisitetskombinasjonene.



Figur 26 Sensitivitetsanalyse av forbrukerprisen ved eksogen kvotepris

Karbonmarkedet er per definisjon uendret.

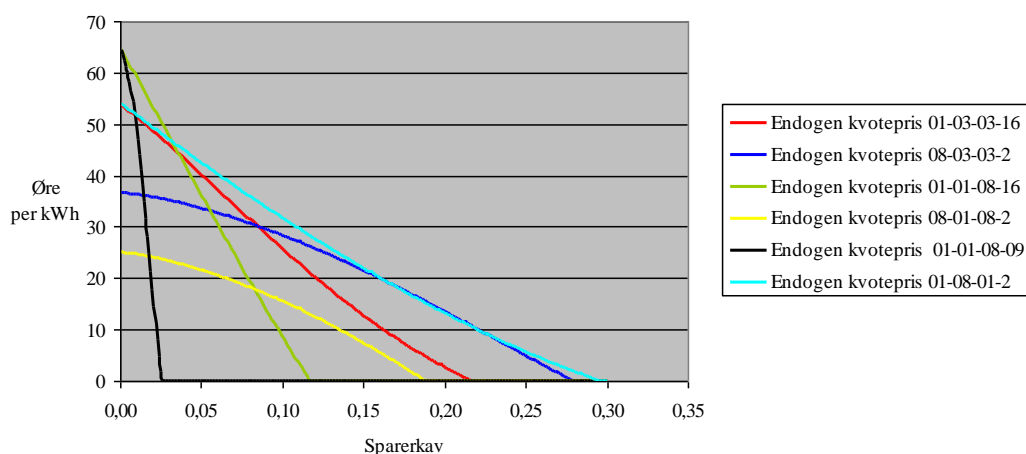
7.1.2 Sensitivitetsanalyse av pris- og volumeffekter ved endogen kvotepris

Sensitivitetsanalysen ved endogen kvotepris har blitt foretatt under antagelsen om lik mengde utslippstillatelser ved alle alternativene. Her er totalt tillatt utslipp satt til 80 prosent av utgangspunktsutslippet uten innblanding fra myndighetene. Med en utslippsintensitet på 0,3 og en sort produksjon på 63 TWh var utslippet på 18,8 millioner tonn CO₂, og utslippstaket er derfor satt til 15 millioner tonn CO₂. Utslippsintensiteten er holdt konstant i alle alternativene. Jeg kommer tilbake til effekten av ulik utslippsintensitet under.

Også under antagelsen om endogen kvotepris bekrefter både de analytiske resultatene, simuleringsresultatene og sensitivitetsanalysen hypotesen om avtagende pris og volum i kraftsektoren ved økt sparekrav. Konklusjonen om avtagende kraftpris og volum ved endogen kvotepris er dermed også robust.

Ved krav om uendret utslipp er resultatene som følger for den endogene kvoteprisen kun rimelige frem til utslippssranken ikke lenger er bindende, det vil si en kvotepris lik null. Økt sparing medfører redusert etterspørsel etter kraft, og dermed redusert produksjon. Men for å opprettholde sort produksjon må kvoteprisen reduseres ved redusert kraftpris. Negativ kvotepris ville medføre at de som slipper ut fikk betalt for å slippe ut. Det antar jeg er utenfor mulighetsområdet.

I motsetning til situasjonen med eksogen kvotepris vil derfor ikke redusert kraftpris medføre redusert lønnsomhet for begge markedsaktørene.



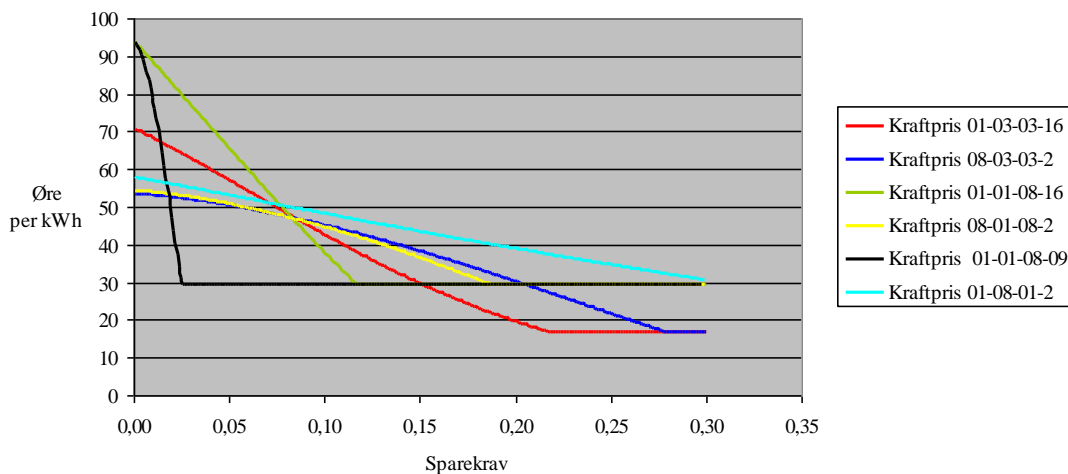
Figur 27 Sensitivitetsanalyse av endogen kvotepris

Vi ser av figur 27 at initial kvotepris varierer mellom de ulike alternativene. Tillatt utslippsmengde er den samme, men som en følge av re-kalibreringen av modellen vil effekten av den gitte kvotemengden resultere i ulike prisnivåer. Nivået er ikke det viktigste her, snarere det robuste resultatet om redusert kvotepris med økende sparekrav.

Figur 27 viser at kvoteprisen starter på det laveste nivået når etterspørselstetnisiteten er størst, ettersom nivået på totalproduksjonen blir mest justert ved høy prisfølsomhet. Ved lavere prisfølsomhet er initial kvotepris høyere. Kvoteprisreduksjonen er størst når tilbudselastisiteten i sort teknologi er høy og den for sparing er lavere (se grønn og sort kurve). Når tilbudselastisiteten i sparing er lav vil forbrukerprisen stige mye med andelskravet, og etterspørselen etter kraft faller raskere enn når elastisiteten er høyere. Dermed faller også kraftprisen raskere. Kombinert med høy elastisitet i sort produksjon må kvoteprisen falle mye ved kraftprisendringen. En liten prisendring har stor effekt på sort, som må oppveies av fall i kvoteprisen for uendret sort produksjon. Ettersom kvoteprisen kun utgjør en andel av kostnaden for sort, må den falle mer enn prisen for å oppveie prisreduksjonen.

Ved å sammenligne kraftprisene (se figur 28) med kvoteprisen ser vi at lavere kraftpris medfører lavere kvotepris. Lav kraftpris medfører lav lønnsomhet i kraftproduksjonen, lavere produksjon og dermed lavere utslipp. Med betingelse om uendret utslipp må dermed kvoteprisen falle slik at produksjonen av sort opprettholdes.

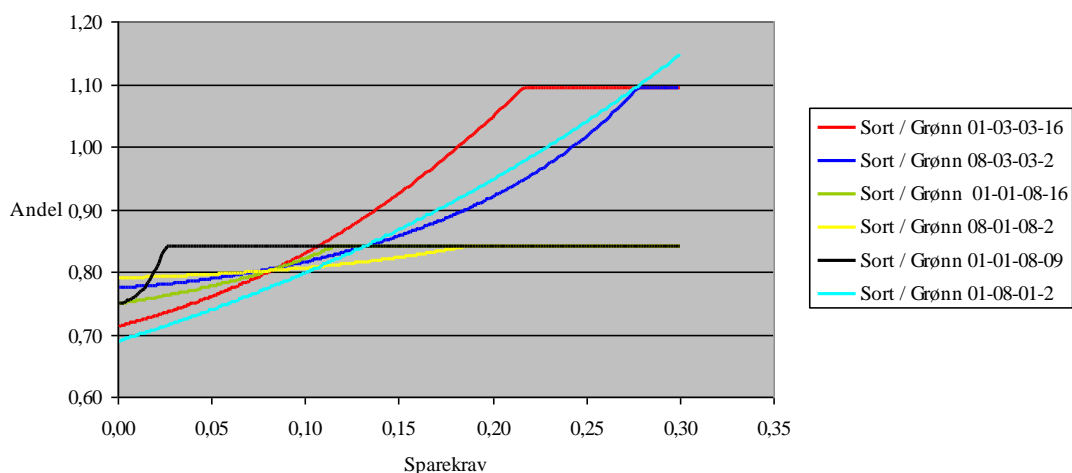
Ser vi på den gule kurven i figur 27 ser vi at høy prisfølsomhet i sparingen gir lavere takt på kvoteprisreduksjonen. Sparekravet er ikke like kostbart for forbrukerne, og kraftetterspørselen reduseres ikke like raskt som når prisfølsomheten er lav. Ved lav etterspørselstetnisitet og høy prisfølsomhet i sparingen ser vi at reduksjonen i kraftetterspørselen er lav nok til å medføre en bindende utslippsskranke for alle sparekravene, og kvoteprisen faller ikke til null.



Figur 28 Sensitivitetsanalyse av utvikling i kraftprisen ved endogen kvotepris

Den reduserte kvoteprisen er et uttrykk for redusert etterspørsel etter kvoter ved redusert lønnsomhet i kraftsektoren.

Ved uendret sort produksjon og redusert kraftetterspørsel må den grønne produsenten ta hele belastningen, og vi får en vridning mellom sort og grønn produksjon. Det bedrede forholdet for den sorte produsenten er dermed et robust resultat. I figur 29 ser vi at andelen sort øker helt frem til kvoteprisen blir null. Forholdet mellom de to produsentene, når de stilles overfor den samme nettoprisen, er ikke lengre en til en, slik som vi så i kapittel 6. Dette kommer av de endrede antagelsene om teknologi (uttrykt gjennom elastisitetene og det kalibrerte konstantleddet). Igjen er ikke nivået det viktigste her, snarere er det robuste resultatet om økende andel skitten produksjon etter hvert som sparekravet stiger viktigst.



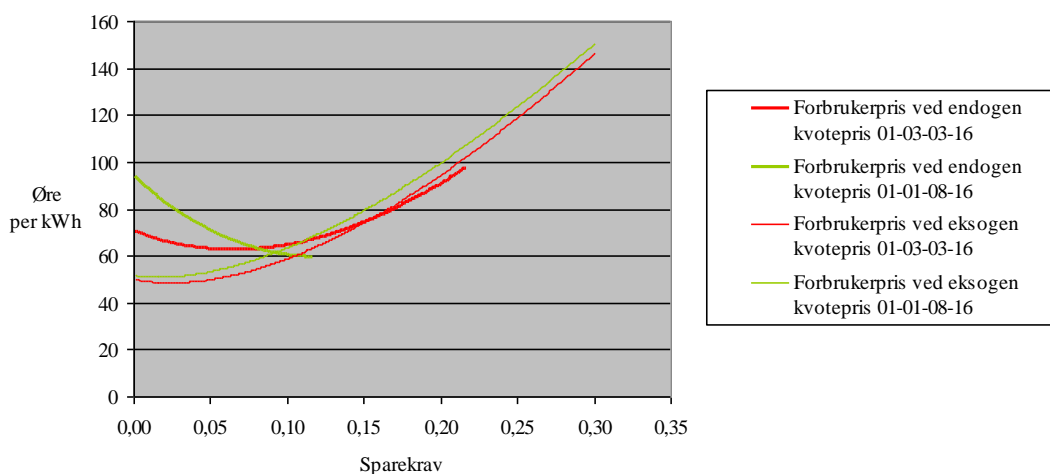
Figur 29 Sensitivitetsanalyse av sammensetning av energibærere ved endogen kvotepris

Det er verdt å merke seg at den turkise linjen, som er den elastisitetkombinasjonen som endret fortegn på forholdet mellom sort og grønn i det eksogene rammeverket her ikke gir det samme resultatet. Men, den høye prisfølsomheten i den grønne teknologien gir nødvendig kraftreduksjon uten stor prisreduksjon. Dette holder lønnsomheten oppe, og utslippstaket på 15 millioner tonn CO₂ er bindende for alle nivåer på sparekravet.

I sparemarkedet ser vi igjen økende sparepris og sparing, uten at det behøver å være et generelt resultat, se diskusjon over.

Når det kommer til prisen for forbrukerne er den, som i det eksogene tilfellet, ubestemt i den analytiske løsningen. Igjen er det forholdet mellom prisutviklingen i kraft- og sparemarkedet som avgjør.

Ved å se på en sammenligning av prisutviklingen for forbrukerne under de ulike kvoteprisregimene (se figur 30) ser vi at den endogene kvoteprisen medfører en i utgangspunktet høyere forbrukerpris. Ved eksogen kvotepris starter totalprisen å stige raskere enn ved endogen kvotepris. Årsaken er at den sorte sektoren kan tilby stadig rimeligere kraft når kvoteprisen faller. For lave sparekrav kan resultatet bli økt totalt konsum av energikrevende goder, med en avtagende andel kraft brukt. Det er verdt å merke seg at selv om kraftforbruket reduseres, reduseres ikke andelen skitten kraft brukt, kun den grønne.



Figur 30 Utvikling i forbrukerprisen ved eksogen og endogen kvotepris

I tillegg til sensitivitetsanalyse med ulike elastisiteter har jeg undersøkt effekten av ulik utslippsintensitet og effekten av ulike nivåer på sammensetningen av energibærere i utgangspunktet. Dette ga ikke utslag i retning på endringene, kun på kvantum. For ytterligere diskusjon, se vedlegg 10.6.

7.2 Hypotesen og problemstilling i lys av diskusjonen

Hypotesen om redusert lønnsomhet og omsatt kvantum i kraftsektoren ved innføring av energieffektiviseringskrav er et robust resultat. Når det kommer til fordelingen av kvantumsreduksjon mellom kraftprodusentene er resultatet følsomt for forholdet mellom elastisitetene ved eksogen kvotepris. Ved endogen kvotepris og uendret utslippstak og intensitet vil den sorte produksjonen holdes konstant, mens den grønne produsenten reduserer produksjonen. Dette er et robust resultat. Som en følge av energieffektiviseringen vil altså det relative forholdet mellom omsatt grønn og sort energi endres, i sort energi sin favør, gitt endogen kvotepris.

Dersom et kraftmarked med en sort produsent som er stor nok til å påvirke kvoteprisen underlegges sparekrav kan altså andelen av omsatt grønn energi falle. Dermed kan innføringen av sparekravet i kombinasjon med sorte sertifikater isolert sett være på kollisjonskurs med ønsket om økt andel fornybar energi i EU. Denne analysen ser på kombinasjonen av sort og hvitt, og tar ikke innover seg effekten av å kombinere både sorte, hvite og grønne sertifikater.

Når det kommer til pris- og volumeffekter i sparemarkedet og for forbrukerne vil forholdet mellom elastisiteter være av betydning. Så lenge reduksjonen i kraftteterspørselen ikke blir for stor vil omsatt sparemengde øke. Dermed spiller forholdet mellom kraft- og spareprisen en rolle for forbrukernes tilpasning, som igjen avgjør omsatt mengde av de to godene. Nivået på kvantumsendringene som oppstår for ulike nivå på sparekravet vil avhenge av relativforholdet innad i kraftsektoren, og mellom kraftsektorelastisitetene og de øvrige elastisitetene.

7.3 Modellspesifikke forutsetninger

Både teori- og analysedelen er gjennomført under forenklinger som påvirker resultatene. Jeg vil her kommentere forutsetningen om rasjonelle aktører, antagelsen om at de sorte produsentene disponerer alle utslippstillatelsene, autarkiantagelsen og fraværet av tidsdynamikk.

Antagelsen om rasjonelle aktører har hatt betydning for kostnadsnivået på uutnyttede energieffektiviseringstiltak som er lagt til grunn. Under rasjonalitetsantagelsen er alle lønnsomme energieffektiviseringsinvesteringer antatt gjennomført. Dersom det derimot finnes uutnyttede kostnadsminimerende investeringer som først utføres etter lovpålegget, vil forbrukerne ende opp i en bedre situasjon enn før sparekravet. Den samme mengden energikrevende goder kan da konsumeres til en lavere pris. Det vil dermed være mulighet for økt totalt energiforbruk etter innføringen av sparekravet, da sertifikatprisen vil bli negativ.

En annen vesentlig antagelse gjort i analysene mine er at energiprodusenten disponerer alle utslippstillatelsene. De sorte produsentene deltar i det europeiske kvotemarkedet, EU ETS, sammen med flere underlagte aktører. Dersom de sorte produsentenes reduserte etterspørsel medfører redusert kvotepris kan det tenkes at andre aktører vil øke kvoteetterspørselen, og dermed vil utslippet fra kraftproduksjonen utgjøre en mindre andel av det totale markedet. Ved uendret utslippsintensitet vil dette medføre en redusert sort produksjon.

Autarkiantagelsen gir grunnlag til antagelsen om stigende tilbudsfunksjoner. Ved å åpne for handel i et lite land (det eksogene rammeverket) vil tilbudskurven være fullstendig elastisk, og produsenter og forbrukere er priskefaste kvantumstilpassere. Ved økt sparing vil prisen på kraft hjemme bli den samme, og effekten med avtagende totalpris forsvinner ettersom sparing er antatt dyrere enn kraft. Dersom produsenten vil opprettholde samme produksjon må eksporten øke. Ettersom kraft ikke kan selges fritt over landegrenser, men er avhengig av tilstrekkelig overføringskapasitet vil eksporten øke frem til ledningen er full, og vi igjen er i autarki. Om vi antar at EU er et marked hvor alle land innfører sparekrav (jf EUs 20/20/20) er vi tilbake til

forutsetningen om stigende tilbudskurver i hele dette markedet. I perioder kan vi få lukkede markeder ved beskrankede overføringslinjer. Vi kan da tenke oss mange lukkede markeder med stigende marginalkostnader i hvert marked.

Denne modellen er statisk, noe som innebærer at dynamikken som beskriver overgangen fra redusert sort produksjon og redusert kvotepris til økt sort produksjon ved lavere kvotepris ikke er med. Denne statiske modellen ser ikke bare bort fra tilpasningsdynamikken, men utelukker også muligheten om endrede kostnader. Ved å se på mellomlang til lang sikt er ikke lengre innsatsfaktorer og teknologien fast. Dermed kan vi forvente en annen utvikling i kostnadskurvene enn den antatt her, og kanskje vil spareteknologien utvikle seg under vissheten om sertifikattildeling. Dette forandrer imidlertid ikke det prinsipielle i de resultatene som fremkommer av denne oppgaven.

8. Konklusjon

Hvite sertifikater har allerede blitt innført i noen av medlemslandene i EU, mens innføringen er under utredning i andre EU-land. Målet med instrumentet er å fremme energieffektivisering, og ved det redusere kraftkonsumet i Europa. Samtidig er EU-landene underlagt et kvotemarked for CO₂-utslippe. Jeg ønsket å undersøke hvilke effekter et energieffektiviseringskrav kan ha på tilpasningen i kraftmarkedet, med særlig vekt på samspillet mellom de hvite og de sorte sertifikatene.

For å analysere de resulterende pris- og volumeffektene i energimarkedet, energieffektiviseringsmarkedet og karbondioksidmarkedet ble en analytisk modell konstruert. Denne modelleringen ga ikke klare resultater, og en simuleringsanalyse ble derfor gjennomført, både under antagelse om eksogen og endogen kvotepris. Ettersom det er knyttet usikkerhet til det empiriske datagrunnlaget benyttet i modellsimuleringen ble også en sensitivitetsanalyse gjennomført.

Den analytiske modelleringen ga uklare totalpriseffekter i sparemarkedet ved økt sparekrav. Simuleringsmodellen viste derimot en entydig økning i sparevolumet ved de andelskravene benyttet i simuleringen; retningen på pris- og volumendringene i energieffektiviseringsmarkedet er felles under begge kvoteprisantagelsene. Ettersom sparekravet innføres som et andelskrav av krafttetterspørselen, er det en teoretisk mulighet for reduksjon i absolutt sparing. Til tross for dette ga ingen av simuleringene støtte til dette resultatet.

De resulterende pris- og volumeffektene i kraftmarkedet totalt, er sammenfallende for de to kvoteprisregimene; ved redusert krafttetterspørsel faller prisen i kraftmarkedet, og total kraftproduksjon faller. Dette resultatet viste seg også å være robust for ulike elastisitetskombinasjoner, uavhengig av elastisitetsantagelsene.

En sentral divergens mellom resultatene ved eksogen og endogen kvotepris er endringen i lønnsomheten for de ulike energibærerne. Under antagelse om eksogen kvotepris vil redusert lønnsomhet i kraftsektoren gå verst utover de mest skitne kraftprodusentene. Den eksogene kvoteprisen medfører en stadig lavere nettopris for

de sorte produsentene sammenlignet med de grønne. Endringen i produksjonsvolumet i de to teknologiene er avhengig av forholdet mellom elastisitetene. For et flertall av kombinasjonene undersøkt her vil forøvrig de sorte produsentene redusere mest.

Under antagelse om endogen kvotepris, og eksogent gitt utslipp, er det derimot de utslippsfrie kraftprodusentene som opplever den største reduksjonen i lønnsomheten. Dette kommer av det robuste resultatet med avtagende kvotepris når sparekravet øker. For å oppnå uendret utslippsmengde må produksjonen i den sorte teknologien per definisjon være uendret. Redusert kraftpris, og lønnsomhet, motsvares av kvoteprisreduksjonen. Denne kvoteprisreduksjonen kommer ikke de grønne produsentene til gode, ettersom deres produksjon er antatt utslippsfri. Modelleringen taler derfor for sannsynligheten for en endring i sammensetning av energibærerne, i den mest skitne teknologiens favør, ved bindende utslippsbeskrankning.

Når det kommer til pris- og volumeffektene i kvotemarkedet avhenger resultatet naturlig nok av antagelsen om kvoteprisregimet. Ved redusert lønnsomhet i kraftproduksjonen og redusert produksjon, faller etterspørselen etter utslippstillatelser. Hvilken effekt denne etterspørselsreduksjonen har på kvotepris avhenger av hvor stor andel de sorte produsentene utgjør av total kvoteetterspørsel. Dersom de sorte produsentene er en liten aktør i kvotemarkedet, påvirkes kvoteprisen lite av etterspørselsreduksjonen, og kvoteprisendringen kan være neglisjerbar. Totalt utslipp fra kraftsektoren faller, mens totalt utslipp i hele økonomien forblir den samme.

Dersom de sorte produsentene derimot utgjør en stor del av kvotemarkedet vil deres reduserte etterspørsel etter kvoter påvirke likevektskvoteprisen. I modelleringen er det antatt at de sorte produsentene utgjør hele kvoteetterspørselen. For å oppnå den samme utslippsmengden må kvoteprisen falle når kraftprisen blir lavere. Total utslippsmengde forblir den samme så lenge kvotekravet er bindende. Dersom kvoteprisbeskrankningen ikke binder vil kvoteprisen falle til null, og totalutslippet vil bli lavere enn taket satt av myndighetene.

Under de stiliserte antagelsene som her ligger til grunn gir modelleringen, og de tilhørende simuleringsresultatene, støtte til hypotesen fremsatt innledningsvis;

Energieffektiviseringen reduserer etterspørselen etter elektrisitet og dermed lønnsomheten i elektrisitetssektoren. Den reduserte lønnsomheten medfører redusert kraftproduksjon, og både grønne og sorte produsenter vil redusere produksjonen. Redusert sort produksjon reduserer etterspørselen etter CO₂-kvoter, og prisen i CO₂-markedet faller. Som en følge av energieffektiviseringen vil derfor lønnsomheten i grønn og sort teknologi endres, i sort energi sin favør. Ved eksogen kvotepris, og endogent utslipp vil denne endringen være motsatt.

Resultatene i denne oppgaven verifiserer denne hypotesen, men hvilke teknologi som reduserer omsatt volum mest er avhengig av antagelse om kvoteprisregime og elastisitetskombinasjoner.

I et lite land som Norge, med liten andel sort kraftproduksjon, vil innføringen av sparekrav potensielt gå ubemerket hen. Kvoteprisen på det europeiske kvotemarkedet vil for norske kraftprodusenter oppleves som eksogen. Ved økt sparekrav, uten eksport- og importmuligheter, vil kraftprisen falle, og produsenter underlagt EU ETS vil oppleve en større reduksjon i nettoprisen enn de som er unntatt fra kvoteregimet.

Dersom hele Europa reduserer kraftetterspørselen vil kvoteetterspørselsskiftet antageligvis være stort nok til å fremprovosere redusert kvotepris. Ettersom andre sektorer enn kraft er underlagt utslippsrestriksjoner vil antageligvis ikke kvoteprisen falle så lavt som til null.

Denne analysen illustrer altså at innføring av sparekrav i kraftsektoren kan påvirke tilpasningen i andre markeder utover kraftmarkedet. Den direkte effekten på sparemarkedet er forventet, mens den indirekte effekten på kvotemarkedet ikke er like åpenlys ved første øyekast. Ved innføring av et instrument som hvite sertifikater er det viktig å undersøke for potensielle samspilleffekter med andre instrumenter.

I denne oppgaven har kun kombinasjonene av sorte og hvite sertifikater blitt analysert, men i EUs 20-20-20 er det også mål om 20 prosentandel grønn energi i 2020. Samspillet mellom de tre sertifikatene vil antagelig innebære mer kompliserte samspilleffekter mellom hvitt og sort diskutert i denne oppgaven, og vil være en interessant forlengelse av analysene som er foretatt her.

9. Litteratur

- Alcott, B. (2005). Jevons' paradox. *Ecological Economics*, 54 (1): 9-21.
- Amundsen, E. S. (2008). Mål og midler i EUs energi- og klimapolitikk: Et kritisk syn. *Samfunnsøkonomen*, 63 (7).
- Amundsen, E. S. & Bye, T. (2010). *Paper in progress*.
- Andersen, F. M., Jensen, S. G., Larsen, H. V., Meibom, P., Ravn, H., Skytte, K. & Tøgeby, M. (2006). Analyses of Demand Response in Denmark. *Risø-R Report (R-1565)*.
- Bellona & Siemens AS. (2007). Energieffektiviseringsrapport - en rapport i regi av Bellona og Siemens.
- Bye, T. (2003). On the Price and Volume Effects from Green Certificates in the Energy Market *Statistics Norway, Research Department (351)*.
- Bye, T. & Bruvold, A. (2008). Multiple instruments to change energy behaviour: The emperor's new clothes? *Energy Efficiency*, 1 (4): 373-386.
- Bye, T. & Hansen, P. V. (2008). How do Spot prices affect aggregate electricity demand? I: *Statistics Norway, Research Department*.
- Bye, T. & Hoel, M. (2009). Grønne sertifikater - dyr og formålsløs fornybar energi. *Samfunnsøkonomen*, 63 (7).
- Böhringer, C. & Rosendahl, K. E. (2009). Green Serves the Dirtiest. On the Interaction between Black and Green Quotas. I: *Discussion Papers, Statistics Norway*.
- Child, R., Langniss, O., Klink, J. & Gaudioso, D. (2008). Interactions of white certificates with other policy instruments in Europe. *Energy Efficiency*, 1 (4): 283-295.
- Council of the European Union. (2007: 7224/1/07). *Presidency Conclusions*. Brussels European Council. Brussel.
- EnergiLink. (2010). *Energikalkulator*. I: Teknisk Ukeblad (red.). Tilgjengelig fra: <http://energilink.tu.no/no/default.aspx> (lest 25. mars).
- Enova & Norsk Industri. (2009). Potensiale for energieffektivisering i norsk landbasert industri.
- European Union. (2003). Directive 2003/87/EC of the European Parliament and of the Council. Establishing a scheme for greenhouse gas emission allowance trading within the Community and amending Council Directive 96/61/EC
- European Union. (2008). Directive 2009/EC of the European Parliament and of the Council. On the promotion of the use of energy from renewable sources amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC.

- Euro WhiteCert. *Euro White Cert PROJECT*. Tilgjengelig fra:
<http://www.ewc.polimi.it/index.php> (lest Januar).
- European Commission. (2005). *Doing More With Less, Green Paper on Energy Efficiency*.
- European Commission. (2010). Tilgjengelig fra:
http://ec.europa.eu/environment/index_en.htm (lest Januar-April 2010).
- Fladen, B. (2007). *Hvite sertifikater: et marked for energieffektivisering : analyse av pris- og volumeffekter*. Ås: [B. Fladen]. 82 bl. s.
- Hanley, N., Shogren, J. F. & White, B. (2007). *Environmental economics: in theory and practice*. Basingstoke: Palgrave Macmillan. XVI, 459 s. s.
- Havskjold, M., LIngeberg, K., Langseth, B. & Halseth, A. (2009). Klima- og energidata, og fremtidig utvikling i byggsektoren. I: Xergia (red.).
- IPCC. (2007). *Fourth Assessment Report*.
- Johnsen, T. A., Korvald, H. M., Pettersen, F. E. & Viggen, K. D. (2008). Handel med utslippsretter for CO₂ og det norske kraftmarkedet. *Samfunnsøkonomen*, 62 (9).
- Klimakur. (2009). Vurdering av fremtidige kvotepriser. *En rapport fra etatsgruppen Klimakur 2020*.
- Klimakur. (2010). Tiltak og virkemidler for å nå norske klimamål mot 2020.
- Lavenergiutvalget. (2009). *Energieffektivisering: Olje- og energidepartementet*.
- MEMO. (2008: 33). *Memo on the Renewable Energy and Climate Change Package*. Brussels.
- Multiconsult. (2009). Notat i NVE 2010. Klimakur 2020 -kalkulasjons- og skrivestøtte.
- Mundaca, L. (2007). Transaction costs of Tradable White Certificate schemes: The Energy Efficiency Commitment as case study. *Energy Policy*, 35 (8): 4340-4354.
- Mundaca, L. (2008). Markets for energy efficiency: Exploring the implications of an EU-wide Tradable White Certificate' scheme. *Energy Economics*, 30 (6): 3016-3043.
- Nordel. (2008). *Annual statistics 2008*. Tilgjengelig fra:
<http://www.entsoe.eu/index.php?id=65>.
- NVE. (2009). *Termisk kraftproduksjon*: NVE. Tilgjengelig fra:
<http://www.nve.no/no/Energistatus-2008/Energiproduksjon/Termisk-kraftproduksjon/> (lest 27.04.2010).

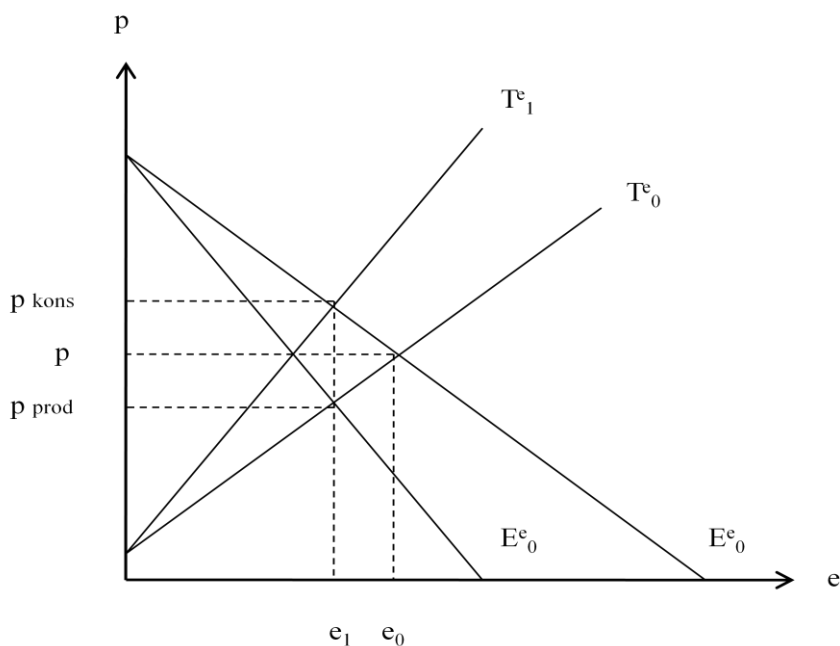
- NVE. (2010a). Kvartalsrapport for kraftmarkedet. 4. kvartal 2009. I: Johnsen, T. A. (red.).
- NVE. (2010b). Tiltak og virkemidler for redusert utslipp av klimagasser fra norske bygninger - et innspill til Klimakur 2020.
- Perman, R., Ma, Y., McGilvaray, J. & Common, M. (2003). *Natural resource and environmental economics*. 3. utg. Harlow: Pearson. 699 s.
- Porter, M. E. & Linde, C. v. d. (1995). Toward a New Conception of the Environment-Competitiveness Relationship. *The Journal of Economic Perspectives*, 9 (4): 97-118.
- Quirion, P. (2006). *Distributional Impacts of Energy-Efficiency Certificates Vs. Taxes and Standards*. Upublisert manuskript.
- Regjeringen. (2009). *Enige om prinsippene for et felles elsertifikatmarked*. 102/09 utg. Pressemelding. Tilgjengelig fra: <http://www.regjeringen.no/nb/dep/oed/pressesenter/pressemeldinger/2009/enige-om-prinsippene-for-felles-elsertif.html?id=575821> (lest 04.02).
- Rutherford, T. (2002). *GAMS*. Tilgjengelig fra: www.mpsge.org (lest 10. mai 2010).
- Strandlund, J. K., Chavez, A. C. & Field, B. C. (2002). Enforcing emission trading programs: Theory, practice, and performance. *Policy Studies Journal*, 30 (3).
- Strøm, S. & Vislie, J. (2007). *Effektivitet, fordeling og økonomisk politikk*. Oslo: Universitetsforl. 313 s. s.
- Tietenberg, T. (2006). *Emissions Trading: Principles and Practice*. 2 utg. Washington, DC.: Resources for the Future.
- Transue, M. & Felder, F. A. (2010). Comparison of energy efficiency incentive programs: Rebates and white certificates. *Utilities Policy*, In Press, Corrected Proof.
- U.S. Department of Energy. (2006). Benefits of Demand Response in Electricity Markets and Recommendations for Achieving Them.
- Voogt, M., Luttmer, M. & de Visser, E. (2006). Review and analysis of national and regional certificate schemes. *EuroWhiteCert PROJECT*: European Commission -Intelligente Energy Programme.
- Weil, N. D. (2005). *Economic Growth*. 1 utg.: Pearson Education.

10. Vedlegg

10.1 Sparekrav pålagt forbruker versus produsent

I figur 31 illustreres påstanden om at resultatet vil bli det samme uavhengig av om kjøpskravet av energieffektivisering pålegges produsentene, representert ved T^e -kurvene, eller forbrukerne, representert ved E^e -kurvene, i kraftmarkedet.

Kjøpskravet innebærer en gitt reduksjon i forbruk av kraft, slik at nedgangen i kvantum e vil være den samme uansett. Dersom kravet pålegges produsentene vil tilbudskurven skifte fra T^e_0 til T^e_1 . Den nye likevektsløsningen flyttes fra e_0 til e_1 , slik politikken er ment å virke. Den nye tilpasningen leses av i skjæringspunktet mellom den nye tilbudskurven, og den opprinnelige etterspørselskurven, E^e_0 . Forbrukerne må betale prisen p^{kons} , mens produsentene mottar prisen p^{prod} . Hadde kjøpskravet derimot blitt pålagt forbrukerne vil etterspørselsfunksjonen skifte til E^e_1 , mens tilbudsfunksjonen forblir uendret. Den samme likevektsløsningen vil oppstå.



Figur 31 Sparekrav pålagt forbruker versus produsent

Avviket mellom prisen p^{kons} og p^{prod} er den prisen energieffektiviserings-produsentene mottar.

10.2 Utrekninger

10.2.1 Eksogen kvotepris

Ved eksogen kvotepris finner vi likevekten i markedet ved de to følgende likningene for energieffektiviseringsmarkedet

$$\alpha d(p_e, \alpha p_{sert}) = m(p_e, p_{sert})$$

og energimarkedet

$$(1 - \alpha) d(p_e, \alpha p_{sert}) = g(p_e) + h(p_e, t)$$

For å evaluere effekten av sparekravet deriverer vi igjennom med hensyn på andelskravet α

Dette gir

$$d + \alpha d' \left(\frac{\partial p_e}{\partial \alpha} + \alpha \frac{\partial p_{sert}}{\partial \alpha} + p_{sert} \right) = m' \left(\frac{\partial p_e}{\partial \alpha} + \frac{\partial p_{sert}}{\partial \alpha} \right)$$

fra energieffektiviseringsmarkedslikningen, og

$$-d + (1 - \alpha) d' \left(\frac{\partial p_e}{\partial \alpha} + \alpha \frac{\partial p_{sert}}{\partial \alpha} + p_{sert} \right) = g' \left(\frac{\partial p_e}{\partial \alpha} \right) + h' \left(\frac{\partial p_e}{\partial \alpha} \right)$$

fra energimarkedslikningen.

Fortegn

$$d = d(p_e, \alpha p_{sert})$$

$$d' = \frac{\partial d}{\partial p_e} \text{ og } \frac{\partial d}{\partial p_w} \text{ begge } < 0$$

$$g' = \frac{\partial g}{\partial p_e} > 0$$

$$h' = \frac{\partial h}{\partial p_e} > 0$$

$$m' = \frac{\partial m}{\partial p_w} = \frac{\partial m}{\partial p_e} \text{ og } \frac{\partial m}{\partial p_{sert}} \text{ begge } > 0$$

For å finne løsningen for de ukjente skriver vi om og forbereder bruk av Cramers regel. Dette gir

$$(\alpha d' - m') \frac{\partial p_e}{\partial \alpha} + (\alpha^2 d' - m') \frac{\partial p_{sert}}{\partial \alpha} = -d - \alpha d' p_{sert}$$

$$((1-\alpha)d' - g' - h')\frac{\partial p_e}{\partial \alpha} + ((1-\alpha)d'\alpha)\frac{\partial p_{sert}}{\partial \alpha} = d - (1-\alpha)d'p_{sert}$$

eller

$$a_{11}\frac{\partial p_e}{\partial \alpha} + a_{12}\frac{\partial p_{sert}}{\partial \alpha} = b_1$$

$$a_{21}\frac{\partial p_e}{\partial \alpha} + a_{22}\frac{\partial p_{sert}}{\partial \alpha} = b_2$$

der

$$a_{11} = \alpha d' - m'$$

$$a_{12} = \alpha^2 d' - m'$$

$$a_{21} = (1-\alpha)d' - g' - h'$$

$$a_{22} = (1-\alpha)d' - m'$$

$$b_1 = -d - \alpha d' p_{sert}$$

$$b_2 = d - (1-\alpha)d' p_{sert}$$

Fra dette finner jeg determinantene, og fortegn

$$\begin{aligned} |A| &= \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix} = a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21} \\ &= [(d' - m')((1-\alpha)d'\alpha)] - [(\alpha^2 d' - m')((1-\alpha)d' - g' - h')] \\ &= (1-\alpha)^2 m' d' + \alpha^2 d'(g' + h') - m(g' + h') \end{aligned}$$

$$|A| < 0$$

$$\begin{aligned} |A_1| &= \begin{vmatrix} b_1 & a_{12} \\ b_2 & a_{22} \end{vmatrix} = b_1 a_{22} - b_2 a_{12} \\ &= [(-d - \alpha d' p_{sert})((1-\alpha)d' - m')] - [d - (1-\alpha)d' p_{sert}][(1-\alpha)d' - g' - h'] \\ &= -dd'\alpha + dm' - (1-\alpha)m'd'p_{sert} \end{aligned}$$

$$|A_1| > 0$$

Dette gir meg løsningen for den deriverte av energiprisen

$$\frac{\partial p_e}{\partial \alpha} = \frac{|A_1|}{|A|} = \frac{-dd'\alpha + dm' - (1-\alpha)m'd'p_{sert}}{(1-\alpha)^2 m' d' + \alpha^2 d'(g' + h') - m(g' + h')} < 0$$

For å finne endringen i sertifikatprisen må jeg først regne ut determinanten A_2

$$\begin{aligned}
|A_2| &= \begin{vmatrix} a_{11} & b_1 \\ a_{21} & b_2 \end{vmatrix} = a_{11}b_1 - a_{21}b_2 \\
&= [(\alpha d' - m')(d - (1 - \alpha)d'p_{sert})] - [(1 - \alpha)d' - g' - h'](-d - \alpha d'p_{sert}) \\
&= dd' - d(m' + g' + h') + d'p_{sert}((1 - \alpha)m' - \alpha(g' + h'))
\end{aligned}$$

$|A_2|$ fortegnet ubestemt. Dermed er også endringsretningen i sertifikatprisen også ubestemt

$$\frac{\partial p_{sert}}{\partial \alpha} = \frac{|A_2|}{|A|} = \frac{dd' - d(m' + g' + h') + d'p_{sert}((1 - \alpha)m' - \alpha(g' + h'))}{(1 - \alpha)^2 m'd' + \alpha^2 d'(g' + h') - m(g' + h')}$$

10.2.2 Endogen kvotepris

Energieffektiviserings- og energimarkedet er som beskrevet over, og representert ved følgende likninger

$$\begin{aligned}
\alpha d(p_e, \alpha p_{sert}) &= m(p_e, p_{sert}) \\
(1 - \alpha)d(p_e, \alpha p_{sert}) &= g(p_e) + h(p_e, t)
\end{aligned}$$

Ved endogen kvotepris utvides likningssystemet med en tredje likning;

$$\gamma h(p_e, t) = \bar{z}$$

som beskriver likevektsløsningen for kvotemarkedet.

For å finne effekten av sparekravet deriverer vi igjennom med hensyn på α . Dette gir

$$\begin{aligned}
d + \alpha d' \left(\frac{\partial p_e}{\partial \alpha} + \alpha \frac{\partial p_{sert}}{\partial \alpha} + p_{sert} \right) &= m' \left(\frac{\partial p_e}{\partial \alpha} + \frac{\partial p_{sert}}{\partial \alpha} \right) \\
-d + (1 - \alpha)d' \left(\frac{\partial p_e}{\partial \alpha} + \alpha \frac{\partial p_{sert}}{\partial \alpha} + p_{sert} \right) &= g' \left(\frac{\partial p_e}{\partial \alpha} \right) + h'_{p_e} \left(\frac{\partial p_e}{\partial \alpha} \right) + h'_t \left(\frac{\partial t}{\partial \alpha} \right) \\
h'_{p_e} \left(\frac{\partial p_e}{\partial \alpha} \right) + h'_t \left(\frac{\partial t}{\partial \alpha} \right) &= 0
\end{aligned}$$

der

$$\begin{aligned}
d &= d(p_e, \alpha p_{sert}) \\
d' &= \frac{\partial d}{\partial p_e} \text{ og } \frac{\partial d}{\partial p_w} \text{ begge } < 0 \\
g' &= \frac{\partial g}{\partial p_e} > 0 \\
h'_{p_e} &= \frac{\partial h}{\partial p_e} > 0
\end{aligned}$$

$$h'_t = \frac{\partial t}{\partial p_e} < 0$$

$$m' = \frac{\partial m}{\partial p_w} = \frac{\partial m}{\partial p_e} \text{ og } \frac{\partial m}{\partial p_{sert}} \text{ begge } > 0$$

Skriver om og forbereder bruk av Cramers regel

$$(\alpha d' - m') \frac{\partial p_e}{\partial \alpha} + (\alpha^2 d' - m') \frac{\partial p_{sert}}{\partial \alpha} = -d - \alpha d' p_{sert}$$

$$((1 - \alpha)d' - g' - h'_{p_e}) \frac{\partial p_e}{\partial \alpha} + ((1 - \alpha)d' \alpha) \frac{\partial p_{sert}}{\partial \alpha} - h'_t \frac{\partial t}{\partial \alpha} = d - (1 - \alpha)d' p_{sert}$$

$$\gamma h'_{p_e} \frac{\partial p_e}{\partial \alpha} + \gamma h'_t \frac{\partial t}{\partial \alpha} = 0$$

eller

$$a_{11} \frac{\partial p_e}{\partial \alpha} + a_{12} \frac{\partial p_{sert}}{\partial \alpha} + a_{13} \frac{\partial t}{\partial \alpha} = b_1$$

$$a_{21} \frac{\partial p_e}{\partial \alpha} + a_{22} \frac{\partial p_{sert}}{\partial \alpha} + a_{23} \frac{\partial t}{\partial \alpha} = b_2$$

$$a_{31} \frac{\partial p_e}{\partial \alpha} + a_{32} \frac{\partial p_{sert}}{\partial \alpha} + a_{33} \frac{\partial t}{\partial \alpha} = b_3$$

der

$$a_{11} = \alpha d' - m'$$

$$a_{12} = \alpha^2 d' - m'$$

$$a_{13} = 0$$

$$a_{21} = (1 - \alpha)d' - g' - h'_{p_e}$$

$$a_{22} = (1 - \alpha)\alpha d'$$

$$a_{23} = -h'_t$$

$$a_{31} = \gamma h'_{p_e}$$

$$a_{32} = 0$$

$$a_{33} = \gamma h'_t$$

$$b_1 = -d - \alpha d' p_{sert}$$

$$b_2 = d - (1 - \alpha)d' p_{sert}$$

$$b_3 = 0$$

Fra dette finner jeg determinantene, og fortegn

$$\begin{aligned}
 |A| &= \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} = a_{11} \begin{vmatrix} a_{22} & a_{23} \\ a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} - a_{12} \begin{vmatrix} a_{21} & a_{23} \\ a_{31} & a_{33} \end{vmatrix} + a_{13} \begin{vmatrix} a_{21} & a_{22} \\ a_{31} & a_{32} \end{vmatrix} \\
 &= -m'h'_i\gamma h'_{p_e} + m'h'_i\gamma h'_{p_e} + d'm'h'_i\gamma - g'm'h'_i\gamma + d'\alpha^2 h'_{p_e} h'_i\gamma - d'\alpha^2 h'_{p_e} h'_i\gamma + d'm'h'_i\gamma\alpha^2 \\
 &\quad + d'g'\alpha^2 h'_i\gamma - m'd'\alpha h'_i\gamma - d'm'\alpha h'_i\gamma \\
 &= \gamma h'_i (m'd'(1-\alpha)^2 - m'g' + \alpha^2 d'g')
 \end{aligned}$$

$$|A| > 0$$

$$\begin{aligned}
 |A_1| &= \begin{vmatrix} b_1 & a_{12} & a_{13} \\ b_2 & a_{22} & a_{23} \\ b_3 & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} = b_1 \begin{vmatrix} a_{22} & a_{23} \\ a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} - a_{12} \begin{vmatrix} b_2 & a_{23} \\ b_3 & a_{33} \end{vmatrix} + a_{13} \begin{vmatrix} b_2 & a_{22} \\ b_3 & a_{32} \end{vmatrix} \\
 &= -d'm'h'_i p_{sert} + dm'h'_i\gamma - dd'h'_i\gamma\alpha + d'm'h'_i\gamma\alpha_{sert} \\
 &= \gamma h'_i (-(1-\alpha)d'm'p_{sert} + m'd - \alpha d'd)
 \end{aligned}$$

$$|A_1| < 0$$

Dette gir meg løsningen for endringen i energiprisen, som avtar med sparekravet

$$\frac{\partial p_e}{\partial \alpha} = \frac{|A_1|}{|A|} = \frac{(-(1-\alpha)d'm'p_{sert} + m'd - \alpha d'd)}{(m'd'(1-\alpha)^2 - m'g' + \alpha^2 d'g')} < 0$$

Som over er endringen i sertifikatprisen ubestemt også under antagelse om endogen kvotepris;

$$\begin{aligned}
 |A_2| &= \begin{vmatrix} a_{11} & b_1 & a_{13} \\ a_{21} & b_2 & a_{23} \\ a_{31} & b_3 & a_{33} \end{vmatrix} = a_{11} \begin{vmatrix} b_2 & a_{23} \\ b_3 & a_{33} \end{vmatrix} - b_1 \begin{vmatrix} a_{21} & a_{23} \\ a_{31} & a_{33} \end{vmatrix} + a_{13} \begin{vmatrix} a_{21} & b_2 \\ a_{31} & b_3 \end{vmatrix} \\
 &= -dh'_i\gamma h'_{p_e} + dh'_i\gamma h'_{p_e} - dm'\gamma h'_i + dd'\gamma h'_i - dg'\gamma h'_i + md'\gamma h'_i p_{sert} \\
 &\quad - m'd'h'_i\alpha p_{sert} - d'g'\alpha\gamma h'_i p_{sert} - d'\alpha\gamma h'_i p_{sert} h'_{p_e} + d'\alpha\gamma h'_i p_{sert} h'_{p_e} \\
 &= \gamma h'_i (dd' - d(m' + g') + d'p_{sert}((1-\alpha)m' - \alpha g'))
 \end{aligned}$$

$$|A_2| \text{ ubestemt}$$

altså

$$\frac{\partial p_{sert}}{\partial \alpha} = \frac{|A_2|}{|A|} = \frac{(dd' - d(m' + g') + d'p_{sert}((1-\alpha)m' - \alpha g'))}{(m'd'(1-\alpha)^2 - m'g' + \alpha^2 d'g')}$$

som er ubestemt.

Når det kommer til den endogene kvoteprisen er den avtagende i sparekravet;

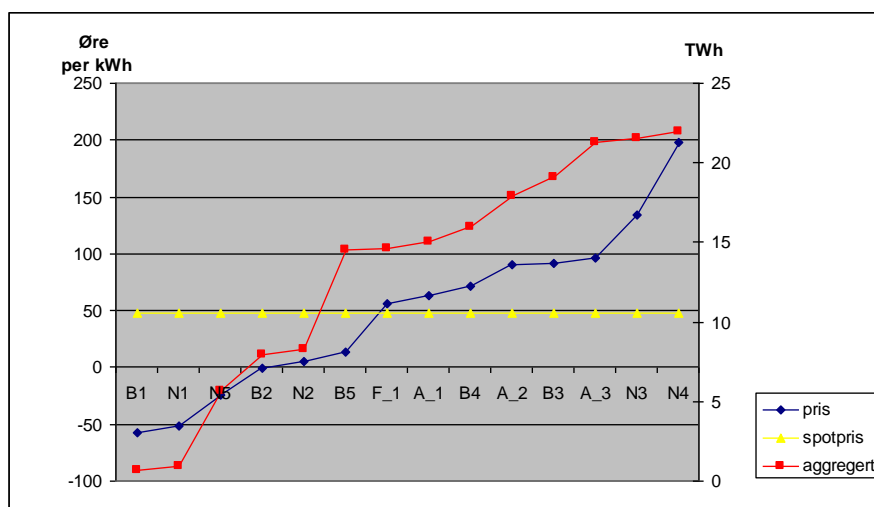
$$\begin{aligned}
 |A_3| &= \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & b_1 \\ a_{21} & a_{22} & b_2 \\ a_{31} & a_{32} & b_3 \end{vmatrix} = a_{11} \begin{vmatrix} a_{22} & b_2 \\ a_{32} & b_3 \end{vmatrix} - a_{12} \begin{vmatrix} a_{21} & b_2 \\ a_{31} & b_3 \end{vmatrix} + b_1 \begin{vmatrix} a_{21} & a_{22} \\ a_{31} & a_{32} \end{vmatrix} \\
 &= dd'\alpha\gamma h'_{p_e} - dm'\gamma h'_{p_e} + d'm'\gamma h'_{p_e} p_{sert} - d'm'\alpha\gamma h'_{p_e} p_{sert} \\
 &= \gamma h'_{p_e} (dd'\alpha - dm' + (1-\alpha)d'm'p_{sert})
 \end{aligned}$$

$$|A_3| < 0$$

$$\frac{\partial t}{\partial \alpha} = \frac{|A_3|}{|A|} = \frac{h'_{p_e} (dd'\alpha - dm' + (1-\alpha)d'm'p_{sert})}{h'_t (m'd'(1-\alpha)^2 - m'g' + \alpha^2 d'g')} < 0$$

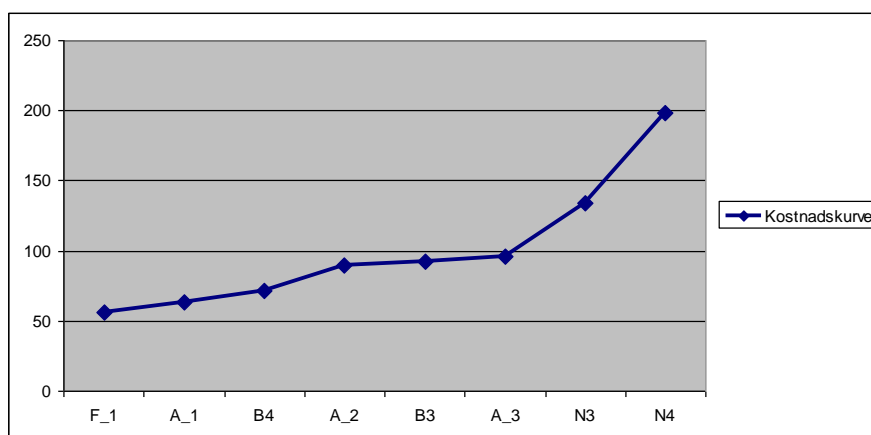
10.3 Estimert kostnadskurve energieffektivisering

Jeg vil se bort fra de tiltakene som har pris lavere en fremskrevet energipris, under forutsetning om rasjonelle aktører. Dersom de tiltakene som har pris under 48 øre per kWh ikke er gjennomført må det skyldes imperfekte markeder, enten ved irrasjonelle aktører eller ved imperfekt informasjonsflyt. Alternativt er de ikke gjennomført ennå, men på vei til å bli gjennomført, slik at når vi ankommer 2020 er de lønnsomme EE-mulighetene utnyttet.



Figur 32 Volumpotensial og kostnad energieffektivisering

Den interessante delen av diagrammet med denne oppgavens antagelser er området fra tiltak F_1, som er det første ulønnsomme tiltaket, frem til tiltak N4 som er det dyreste tiltaket. Fra F_1 til N4 øker mengden energi spart med 7,38 TWh, mens prisen stiger med 142 øre, fra 56 til 198 øre per kWh. Med denne informasjonene er den implisitte elastisiteten regnet ut til å være 1,6.



Figur 33 Estimert kostnadskurve energieffektivisering

Tabell 2 Forkortelser sparetiltak

Forkortelse	Tiltak	Sektor/industri
B1	Energioppfølging	Bolig
N1	Energioppfølging	Næringsbygg
N5	Lavenergiløsninger	Næringsbygg
B2	Etterisolering	Bolig
N2	Etterisolering	Næringsbygg
B5	Lavenergiløsninger	Næringsbygg
B4	Energistyringsystemer	Bolig
B3	Beste tilgjengelige teknologi	Bolig
N3	Beste tilgjengelige teknologi	Næringsbygg
N4	Energistyringsystemer	Næringsbygg
F_1	Ny transformator (magan)	Ferrolegeringsindustrien
A_1	Nye brennover	Aliminimumsindustrien
A_3	Nye likerettere	Aliminimumsindustrien

10.4 Den kalibrerte modellen benyttet i analysen

Simuleringene av den partielle likevekten for de tre markedene tar utgangspunkt i Cobb-Douglas funksjoner. Jeg vil først presentere tilbudssiden før jeg illustrerer modelleringen av etterspørsel og til slutt setter opp myndighetsinnførte skranker og likevektsbetingelsene.

I det følgende er p_e elektrisitetsprisen, t kvoteprisen, p_{sert} sertifikatprisen, p_w totalpris til spareprodusentene, mens p_k er prisen forbrukerne må totalt for de to godene.

Cobb-Douglas funksjonen for tilbud av sort kraft er gitt ved

$$X_s = A_s(p_e - t)^{\varepsilon_s}$$

der A_s er kalibreringsfaktoren og ε_s er tilbudselasticiteten. De sorte produsentene må kjøpe kvoter i kvotemarked, og oppnår dermed en lavere nettoppris enn de grønne produsentene. Deres tilbudsfunksjon er gitt ved

$$X_g = A_g(p_e)^{\varepsilon_g}$$

der A_g er kalibreringsfaktoren og ε_g tilbudselasticiteten.

Tilbudet av sparing er gitt ved

$$X_w = A_w(p_e + p_{sert})^{\varepsilon_w}$$

der A_w er kalibreringsfaktoren i tilbudet av sparing, mens ε_w er elasticiteten. Der summen av de to prisene gir totalprisen til produsenter av sparing, $p_w = p_e + p_{sert}$

Etterspørselen etter total mengde kraft og krafteffektiviserende teknologi er representert ved en felles etterspørselsfunksjon, der de to godene antas å være perfekte substitutter.

$$X_d = A_d(p_k)^{\varepsilon_d}$$

som over er A_d kalibreringsfaktoren, mens ε_d er etterspørselselasticiteten, og der

$$\begin{aligned} p_k &= (1 - \alpha)p_e + \alpha p_w \\ &= p_e - \alpha p_e + \alpha p_e + \alpha p_{sert} \end{aligned}$$

Myndighetenes inngrep i markedet modellers ved de følgende likningene

$$Z = \gamma X_s$$

der Z er total mengde tillatt utslipp, mens γ angir utslipsintensiteten per enhet sort energi produsert.

Sparekravet medfører følgende skranke

$$X_w = \alpha(X_s + X_g)$$

eller $X_w = \alpha X^{2020}$ der X^{2020} angir fremskrevet energikonsum.

I likevekt må

$$\alpha X_d = X_w$$

$$\alpha [A_d(p_k)^{\varepsilon_k}] = [A_w(p_e + p_{sert})^{\varepsilon_w}]$$

i energieffektiviseringsmarkedet,

$$X_d = X_s + X_g$$

$$(1 - \alpha) [A_d(p_k)^{\varepsilon_k}] = A_s(p_e - t)^{\varepsilon_s} + A_g(p_e)^{\varepsilon_g} \text{ i energimarkedet og}$$

$$\gamma X_s = Z$$

$$\gamma [A_s(p_e - t)^{\varepsilon_s}] = Z \text{ er skranken som gir positiv karbonverdi.}$$

10.5 GAMS simuleringsmodell

Option NLP = CONOPT2;

*Option NLP = MINOS5;

file res /HS_u_SS.res/;

SETS

ALFA_ITER/0*300/

;

PARAMETERS

AD	Konstantledd etterspørselsfunksjon
EpsilonD	Priselastisitet etterspørselsfunksjon
AG	Konstantledd grønne produsenter
EpsilonG	Tilbudselastisitet grønne produsenter
AS	Konstantledd sorte produsenter
EpsilonS	Tilbudselastisitet sorte produsenter
AW	Konstantledd EE
EpsilonW	Tilbudselastisitet EE
Alfa	Sparekrav
P_0	Antatt kraftpris før innføringen av sparekravet
XD_0	Antatt etterspørsel etter energi før innføringen av sparekravet
XTG_0	Antatt tilbud grønn energi før innføringen av sparekravet
XTS_0	Antatt tilbud sort energi før innføringen av sparekravet
XTW_0	Antatt tilbud EE før innføringen av sparekravet
T_0	Eksogen kvotepris
T	Den delen av kvoteprisen som blir endogen senere
GAMMA	Utslippskoeffisienten
KAPPA	Skranke på utslippet

;

*PARAMETER FOR LAGRINAG AV RESULTAT VARIERENDE ALFAER

PARAMETERS

XD_ALFA(ALFA_ITER)	Etterspørsel etter kombinasjonsgodet TWh per år
XT_ALFA(ALFA_ITER)	Totalt tilbud energi TWh per år
XTG_ALFA(ALFA_ITER)	Tilbud grønn energi TWh per år
XTS_ALFA(ALFA_ITER)	Tilbud sort energi TWh per år
XTW_ALFA(ALFA_ITER)	Samlet tilbud spart hvit energi TWh per år
PK_ALFA(ALFA_ITER)	Forbrukerpris øre per kWh
PG_ALFA(ALFA_ITER)	Pris produsent grønn i øre per kWh
PS_ALFA(ALFA_ITER)	Pris produsent sort i øre per kWh
PE_ALFA(ALFA_ITER)	Pris energimarkedet øre per kWh
PW_ALFA(ALFA_ITER)	Pris produsent EE i øre per kWh
Z_ALFA(ALFA_ITER)	Endogent utslipp

;

Alfa	= 0;
EpsilonD	= -0.1;
EpsilonG	= 0.3;
EpsilonS	= 0.3;
EpsilonW	= 1.6;
P_0	= 48;
XD_0	= 126;
XTG_0	= 63 ;

```

XTS_0      = 63;
XTW_0      = 0;
PW_0       = 71.5;
AW         = 0.00150551310663274;
T_0        = 4.0;
T          = 5.0;
GAMMA      = 0.3;
KAPPA      = 1;

```

```

*kalibrering konstantledd etterspørsel
AD=XD_0/(P_0**EpsilonD);

```

```

*kalibrering konstantledd grønn produsent
AG=XTG_0/(P_0**EpsilonG);

```

```

*kalibrering konstantledd sort produsent
AS=XTS_0/((P_0-T_0-T)**EpsilonS);

```

```

DISPLAY AD, AG, AS;

```

VARIABLES

```

XD      Etterspørsel etter energi TWh per år
XT      Totalt tilbud av energi TWh per år
XTG     Tilbud av grønn energi TWh per år
XTS     Tilbud av sort energi TWh per år
XTW     Samlet tilbud energisparing TWh per år
PE      Pris i kraftmarkedet øre per kWh
PK      Forbrukerpris i øre per kWh
PG      Pris produsent grønn i øre per kWh
PS      Pris produsent sort i øre per kWh
PW      Pris produsent sparing i øre per kWh
Z       Endogent utslipp
OPT     Optimand
;

```

```

POSITIVE VARIABLES XD, XT, XTG, XTS, XTW, PK, PG, PS, PW, PE, Z;

```

```

PE.LO = 0.01;
PK.LO = 0.01;
PG.LO = 0.01;
PS.LO = 0.01;
PW.LO = 0.01;

```

EQUATIONS

```

XDD      Etterspørsel etter energi i TWh per år
XTGG     Tilbud av grønn energi TWh per år
XTSS     Tilbud av sort energi TWh per år
XTT      Totalt tilbud av energi TWh per år
XTWW     Samlet tilbud energisparing TWh per år
XTSERTT  Sparekrav
PKK      Forbrukerpris
PSS      Nettopris sorte produsenter
EQUKRAFT Likevektsbetingelse i kraftmarkedet
UTSL     Utslippsdynamikk og skranke
OPTI     Optimand
;

```



```

XDD..      XD      =E=    AD*(PK**EpsilonD);
XTGG..     XTG     =E=    AG*(PE**EpsilonG);
XTSS..     XTS     =E=    AS*(PS**EpsilonS);
XTT..      XT      =E=    XTG + XTS;
XTWW..     XTW     =E=    AW*(PW**EpsilonW);
XTSERTT..  XTW     =E=    Alfa*XT;
PKK..      PK      =E=    (1-alfa)*PE + ALFA*PW;
PSS..      PS      =E=    PE - T_0 -T;
EQUKRAFT.. XD      =E=    XT + XTW;
UTSL..     Z       =E=    (GAMMA*XTS)/KAPPA;

```

* UTSL likningen kommer av $Z \cdot KAPPA = GAMMA \cdot XTS$.
 *KAPPA = 1 gir ingen skranke.

```
OPTI..      OPT      =E=    0;
```

```
MODEL HS_ALFAITER/ALL/ ;
```

```
LOOP(ALFA_ITER,
```

```
ALFA=(ORD(ALFA_ITER)-1)/1000;
```

```
SOLVE HS_ALFAITER using NLP maximizing OPT;
```

```

XD_ALFA(ALFA_ITER)      = XD.L;
XT_ALFA(ALFA_ITER)      = XT.L;
XTG_ALFA(ALFA_ITER)     = XTG.L;
XTS_ALFA(ALFA_ITER)     = XTS.L;
XTW_ALFA(ALFA_ITER)     = XTW.L;
PK_ALFA(ALFA_ITER)      = PK.L;
PG_ALFA(ALFA_ITER)      = PG.L;
PS_ALFA(ALFA_ITER)      = PS.L;
PE_ALFA(ALFA_ITER)      = PE.L;
PW_ALFA(ALFA_ITER)      = PW.L;
Z_ALFA(ALFA_ITER)       = Z.L;

```

```
);
```

```

DISPLAY XD.L, XT.L, XTG.L, XTS.L, XTW.L, PK.L, PG.L, PS.L, PE.L, PW.L, Z.L, OPT.L;
DISPLAY XD_ALFA, XT_ALFA, XTG_ALFA, XTS_ALFA, XTW_ALFA, PK_ALFA, PG_ALFA,
PS_ALFA, PE_ALFA, PW_ALFA, Z_ALFA;

```

*Ved endogen kvotepris ser likningssystemet likt ut, men T og Z bytter plass i

*alle steder de to opptrer, dvs T blir en variabel, mens Z blir en parameter.

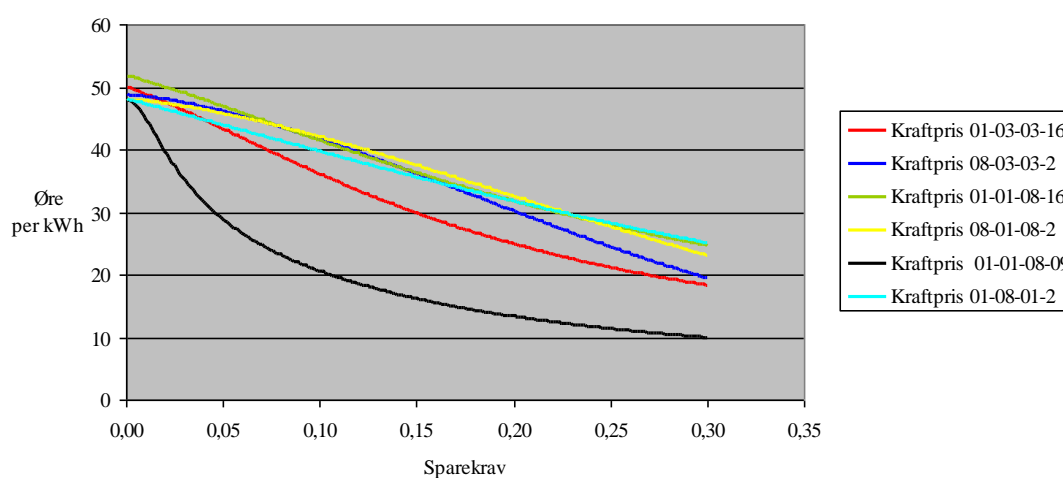
10.6 Vedlegg til sensitivitetsanalysen

Etter gjennomgangen av sensitivitetsanalysen ved ulike elastisiteter følger resultater ved ulik antagelse om utslippsintensitet og ulike antagelser om andelen sort og grønn energi før sparekravet innføres.

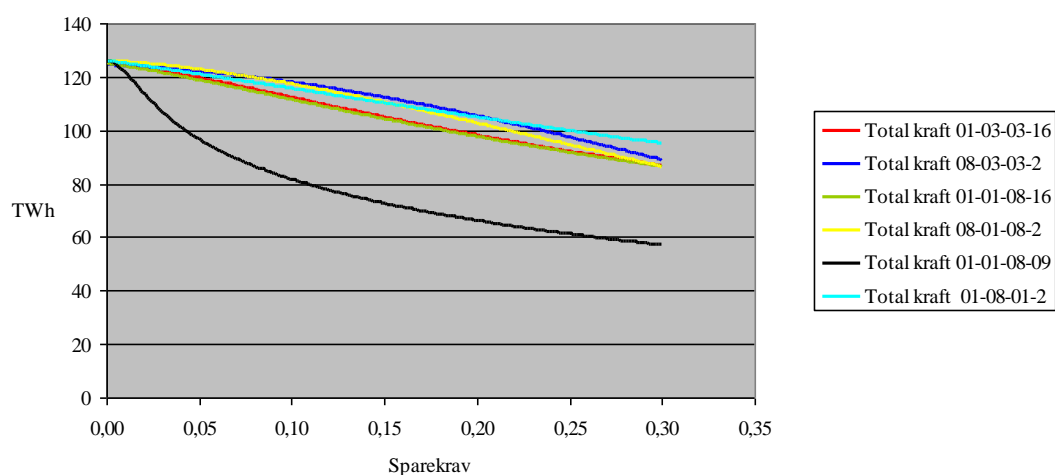
10.6.1 Eksogen kvotepris

Pris- og volumeffekter i kraftmarkedet

Som diskutert er kraftprisen og dermed omsatt kvart avtagende for i alle elastisitetskombinasjonene.



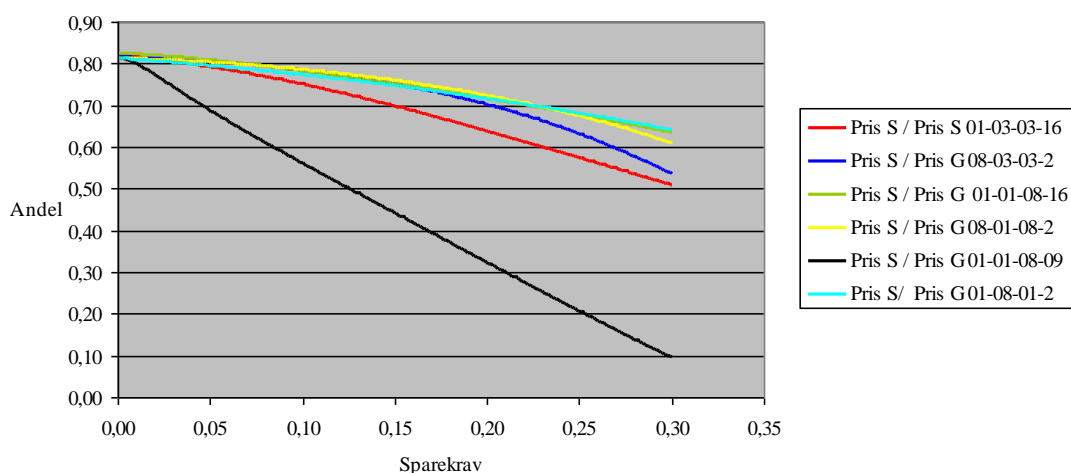
Figur 34 Kraftprisutvikling ved eksogen kvotepris



Figur 35 Kraftvolumsutvikling ved eksogen kvotepris

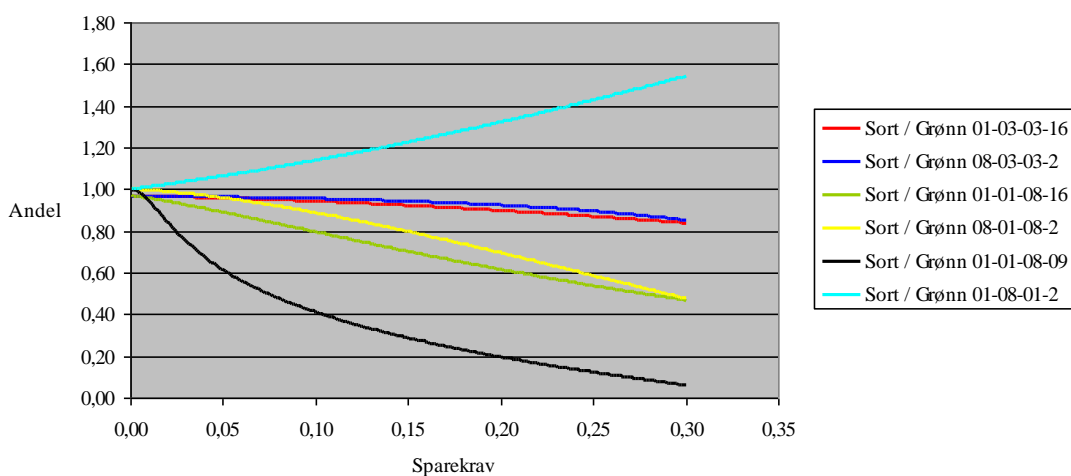
Sammensetning av energibærere ved økt sparekrav

Ved å sammenligne de to neste figurene under ser vi at utviklingen i prisforholdet ikke er den sterkeste driveren i sammensetningen av energibærer i kraftsektoren.



Figur 36 Relativ nettopris Sort og Grønn ved eksogen kvotepris

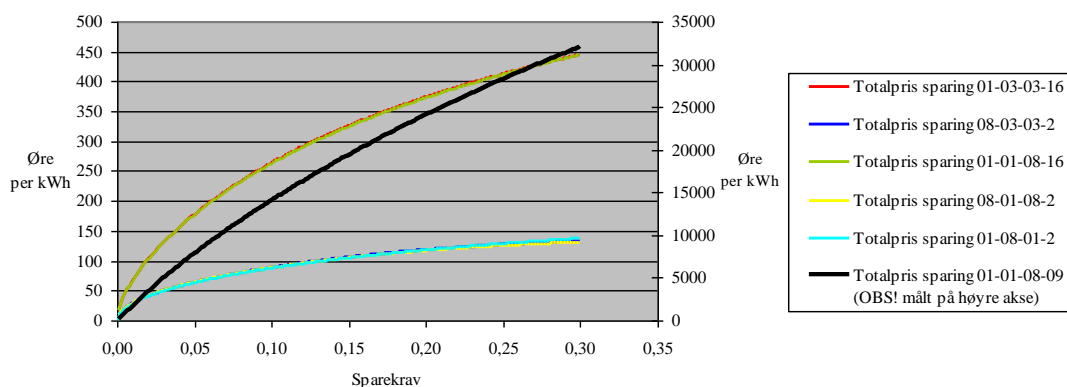
Det blir relativt mer sort energi ved økt andelskrav under antagelse om elastisitet på 0,8 i den grønne teknologien mot 0,1 i den sorte, til tross for forverring av relativ prisforhold for den sorte produsenten.



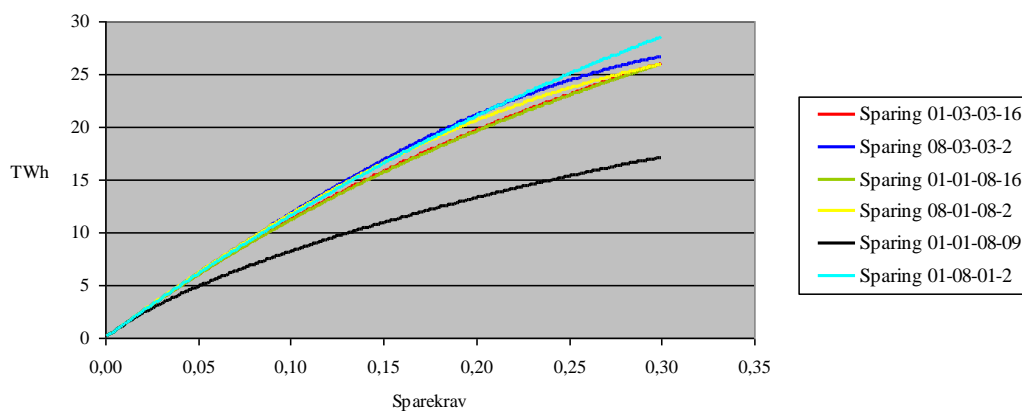
Figur 37 Relativt volum Sort og Grønn ved eksogen kvotepris

Pris- og volumeffekter i sparemarkedet

Den enorme prisstigningen ved antagelse om elastisitet på 0,9 i sparingen medfører at resultatet for denne prisen måles på høyre y-akse. I alle elastisitetskombinasjonene stiger spareprisen og omsatt kvantum.



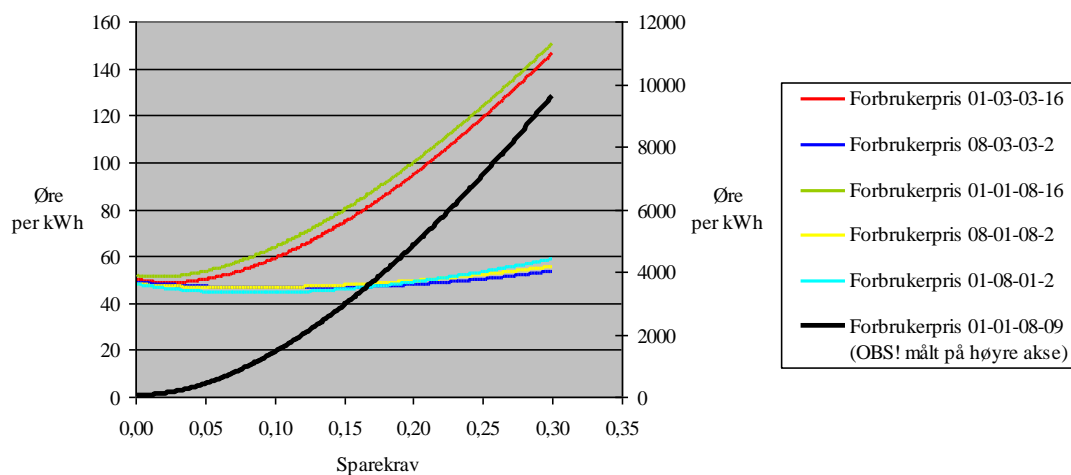
Figur 38 Totalprisutvikling for spareprodusenten ved eksogen kvotepris



Figur 39 Sparevolumsutvikling ved eksogen kvotepris

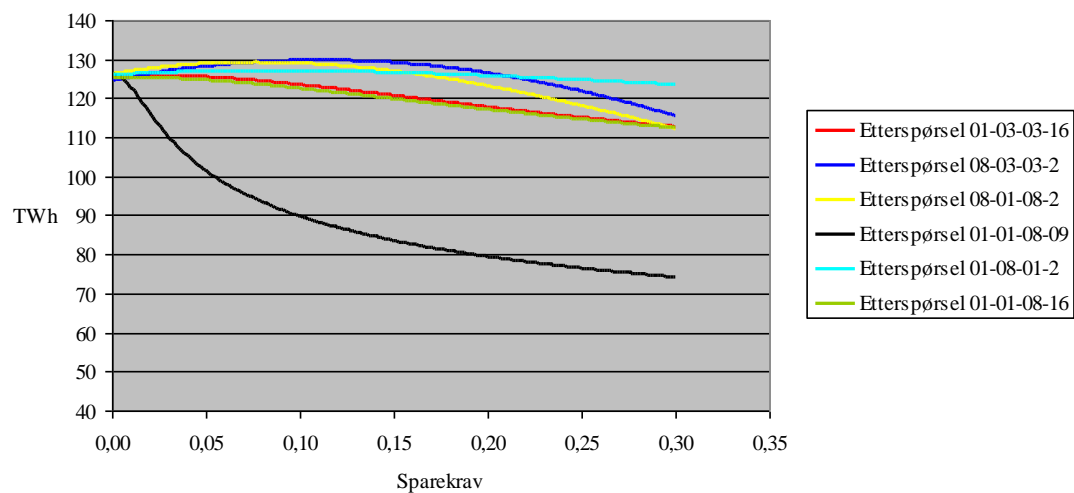
Pris- og volumeffekter for forbrukene

Legg merke til den kraftige veksten ved høy sparepris, det vil si ved elastisitet lik 0,9. Av figur 40 ser det ut til at forbrukerprisens i utgangspunktet er null ved denne elastisiteten, men den ligger omkring 48 øre per kWh, slik som de andre.



Figur 40 Forbrukerprisutvikling ved eksogen kvotepris

Kvantumstilpasningen speiler prisendringene.

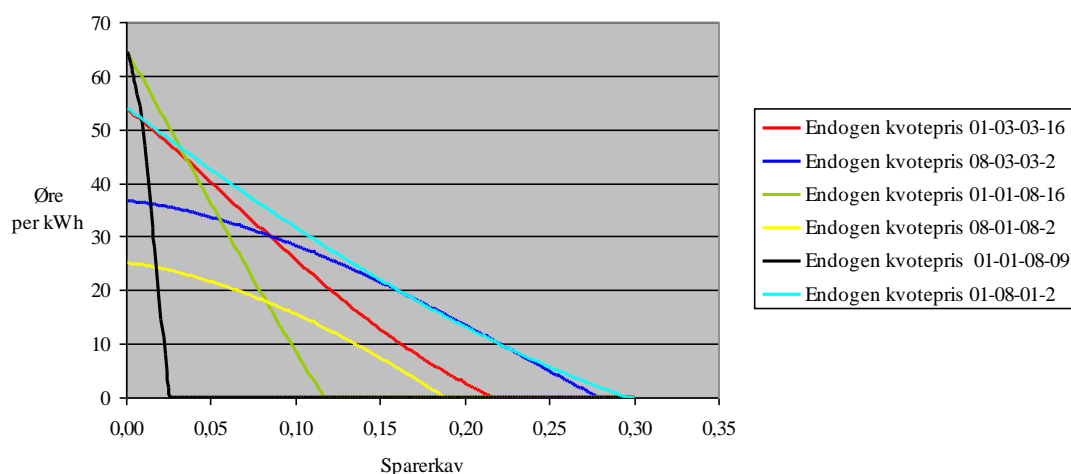


Figur 41 Totalforbruk ved eksogen kvotepris

10.6.2 Endogen kvotepris

Utviklingen i kvoteprisen

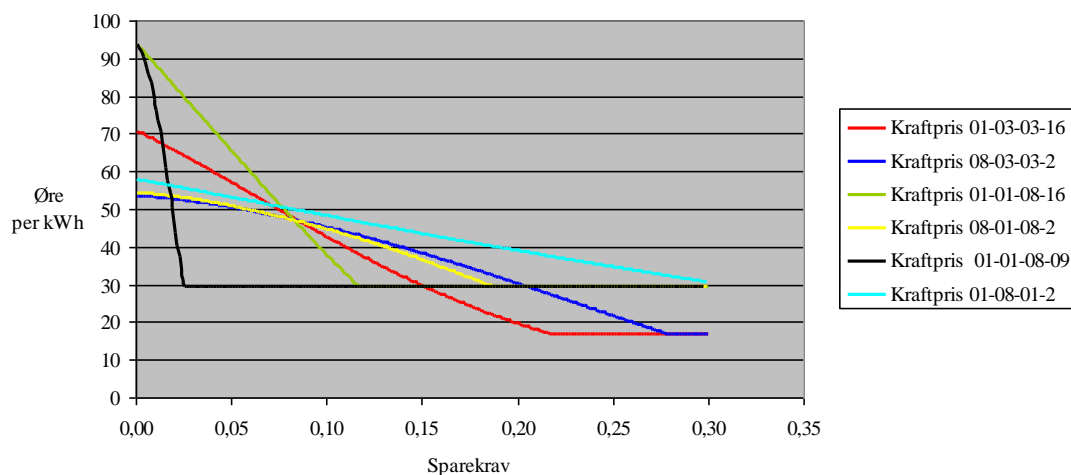
Vi ser at kvoteprisen faller til null når lønnsomheten i kraftsektoren reduseres.



Figur 42 Endogen kvoteprisutvikling

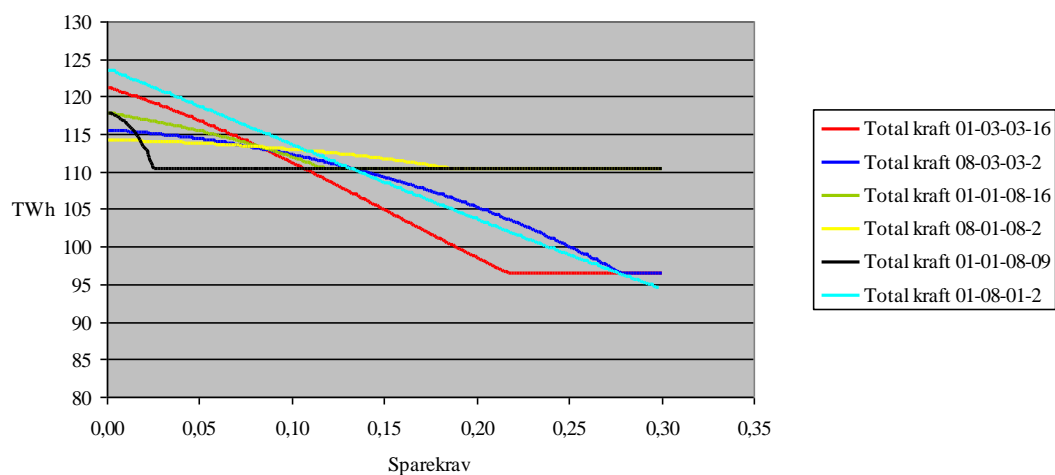
Pris- og volumeffekter i kraftmarkedet

Når kvoteprisen faller til null slutter kraftprisen å falle. Dette kommer av betingelsen om uendret sort produksjon i modelleringen.



Figur 43 Kraftprisutvikling ved endogen kvotepris

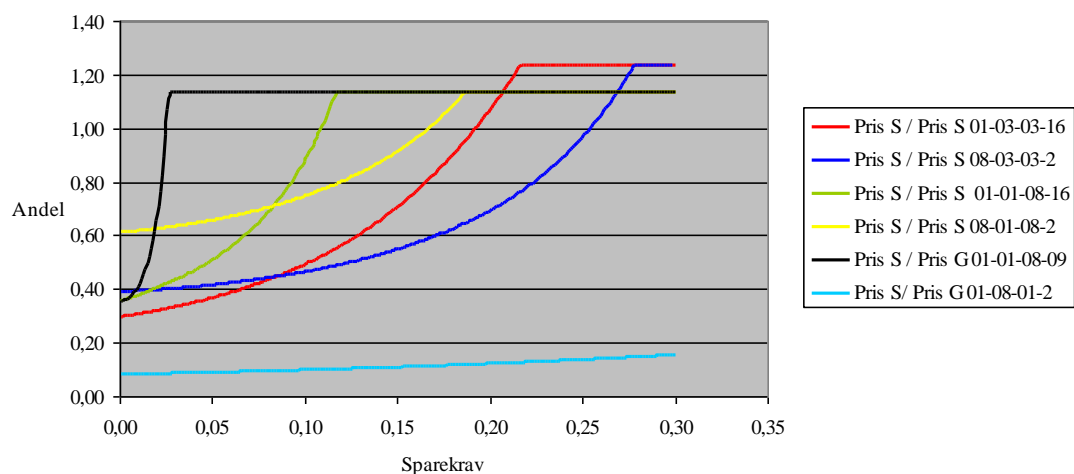
Prisen som sørger for konstant sort produksjon avhenger av antagelsen om teknologien (elastisiteten), og variere derfor mellom alternativene.



Figur 44 Kraftvolumsutvikling ved endogen kvotepris

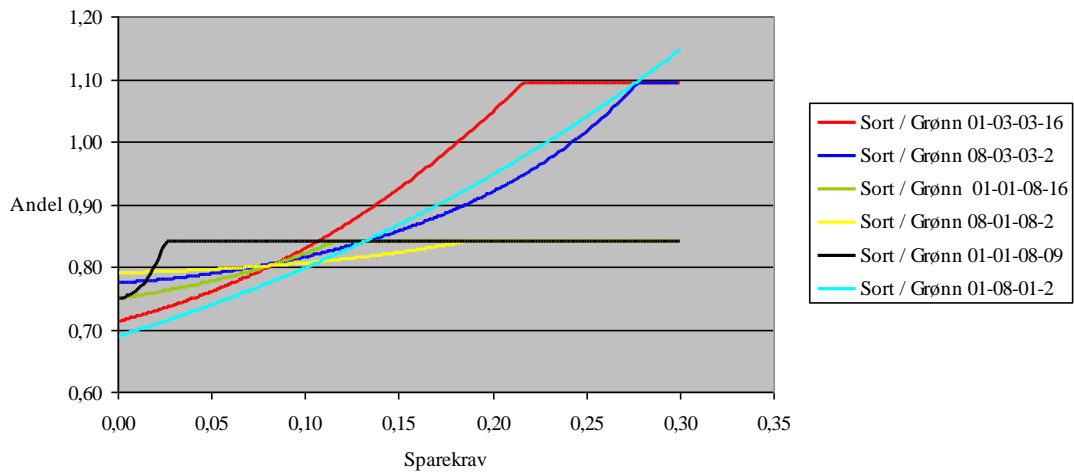
Sammensetning av energibærere ved økt sparekrav

Her ser vi at resultatet med bedre relativ pris og dermed volum tilbudt er robust for ulike elastisitetskombinasjoner.



Figur 45 Relativ nettopris Sort og Grønn ved endogen kvotepris

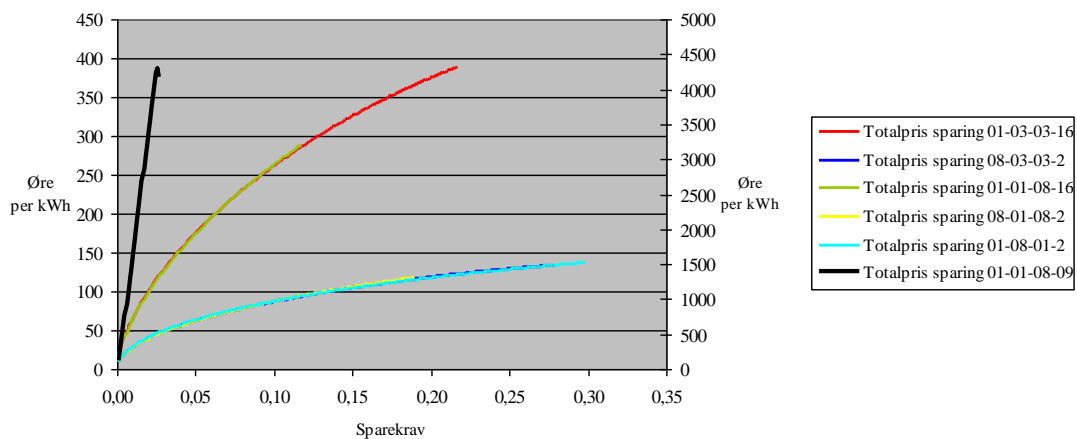
Den resulterende nivået på forholdet mellom sort og grønn produksjon når de stilles overfor samme nettopris er avhengig av antagelsene om teknologiene.



Figur 46 Relativ volumn Sort og Grønn ved endogen kvotepris

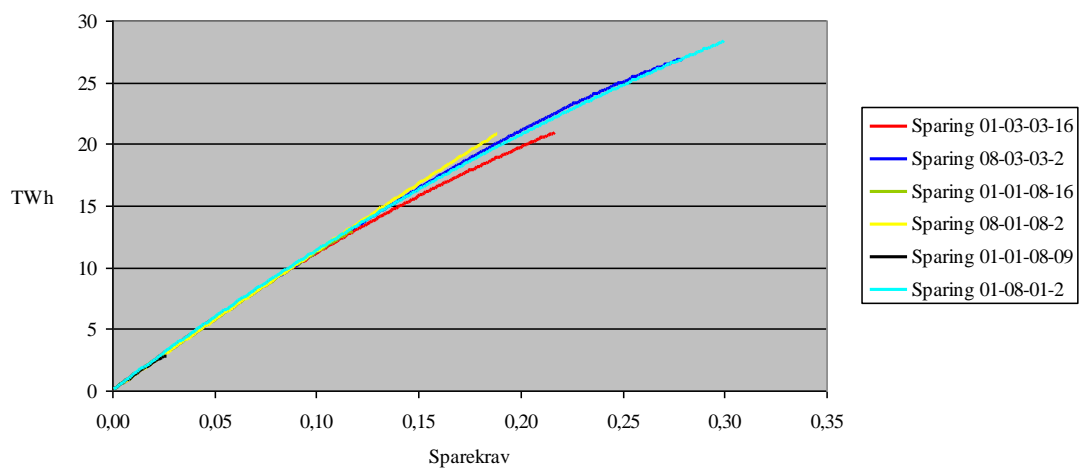
Pris- og volumeffekter i sparemarkedet

I de følgende resultatene må vi se bort fra observasjoner etter kvoteprisen har fat til null, representert ved kvekk i grafene. Dette kommer av en modellspesifisering, og gir utolkbare resultat.



Figur 47 Totalprisutvikling for spareprodusenten ved endogen kvotepris

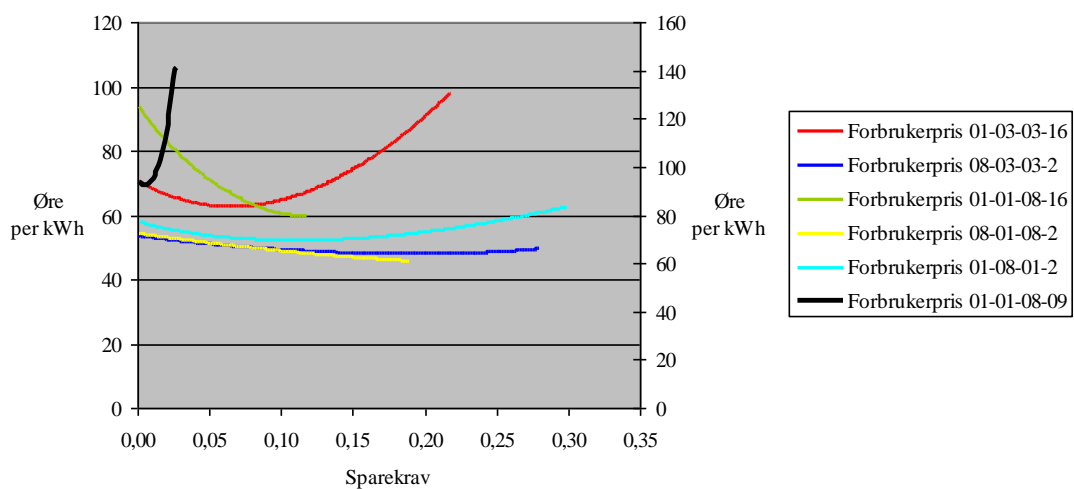
Igjen ser vi at spareprisen og kvantum stiger.



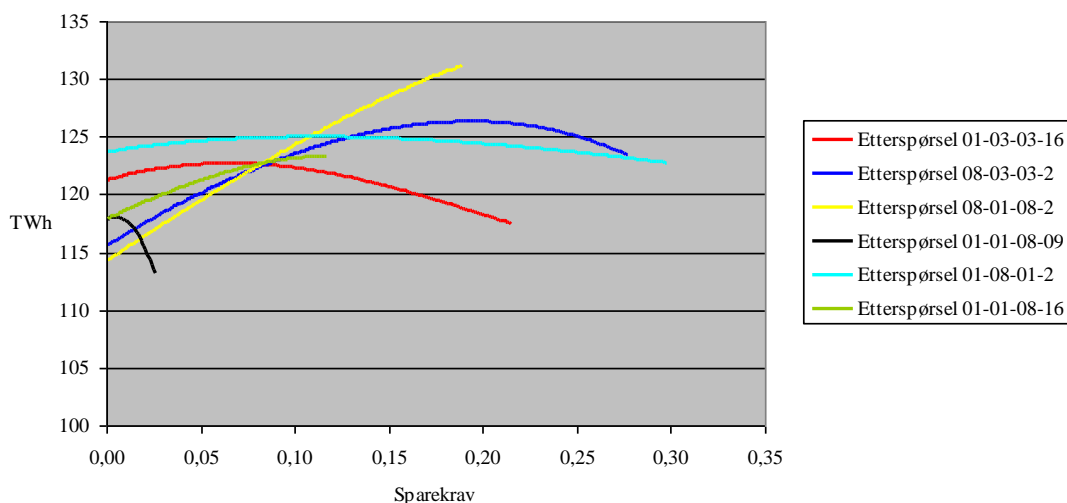
Figur 48 Sparevolumsutvikling ved endogen kvotepris

Pris- og volumeffekter for forbrukene

Igjen er det forholdet mellom redusert kraftpris og økt sparepris som avgjør endringene i forbrukerprisen.



Figur 49 Forbrukerprisutvikling ved endogen kvotepris



Figur 50 Totalforbruk ved endogen kvotepris

Sammenligning av endogen og eksogen forbrukerpris.

10.6.3 Ulik utslippsintensitet

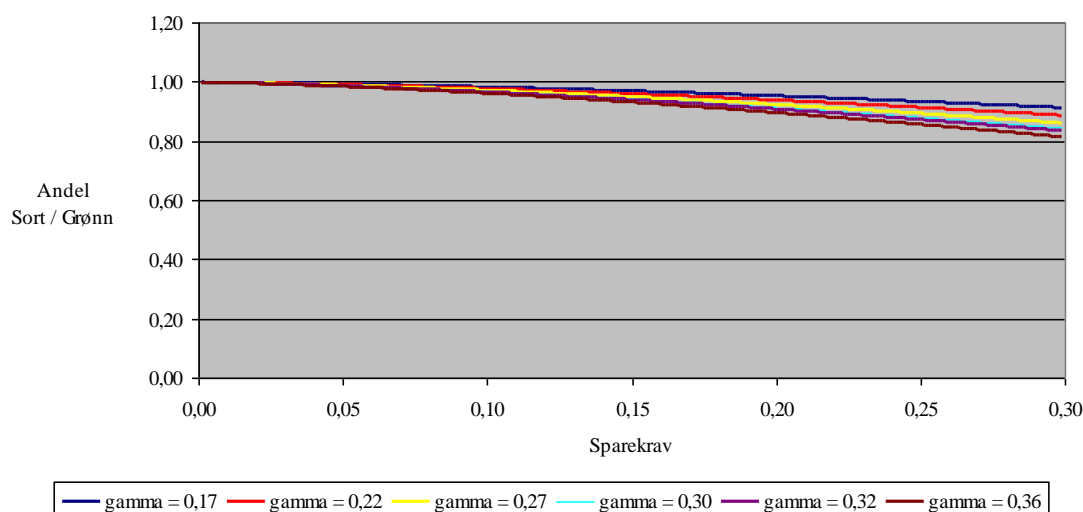
Estimatene for utslippsintensitet fra EnergiLink er på 0,17 kilo co2 per kWh produsert ved bruk av gass, og på 0,36 kilo ved bruk av kull. Johnsen et al. baserer sine analyser på utslippsintensitet på henholdsvis 0,22 og 0,32. Klimakur bruker et felles estimat på 0,27, mens denne oppgaven er basert på en antagelse om 0,3. Dette innebærer altså et utslipp på 300 gram CO₂ per kWh produsert.

Resultatene i figur 51 stammer fra simuleringer med ulike nivåer på utslippsintensiteten. Med en fremskrevet kvotepris på 330 kroner per tonn CO₂, eller 33 øre per kilo, blir de resulterende skattene for de ulike utslippsintensitetene som følger

Tabell 3 Sensitivitetsanalyse ved ulik utslippsintensitet

Utslippsintensitet (gamma)	Eksogen skatt
0,17	5,61
0,22	7,26
0,27	8,90
0,30	9,90
0,32	10,56
0,36	11,88

Andelen sort utgjør av total produksjon faller med sparekravet, og desto mer skitten teknologi de sorte produsentene benytter desto verre er deres situasjon relativt til de grønne, når sparekravet øker. Årsaken til dette er at med avtagende etterspørsel etter energi faller prisen, mens en uendret skatt vil medføre at skatten stadig utgjør en større andel av nettoprisen til de sorte, og de opplever et større prisfall enn de grønne.



Figur 51 Relativ volum Sort og Grønn ved ulike utslippsintensitet og eksogen kvotepris

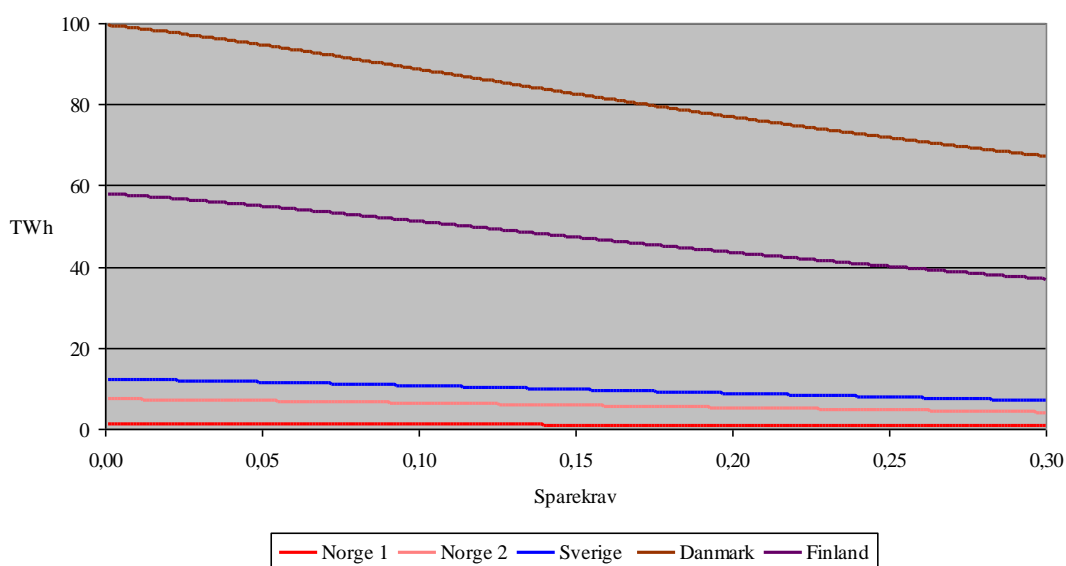
10.6.4 Ulike andeler i utgagnspunktet

I resultatene presentert over antas de sorte og de grønne produsentene å dele markedet mellom seg, før reguleringen finner sted. Det vil si at halvparten av kraftproduksjonen initialt produseres ved sort teknologi, mens den andre halvparten produseres med fornybare ressurser.

I Danmark produseres omkring 80 prosent av kraften ved bruk av termisk produksjonsteknologi. I Finland ligger denne på omkring halvparten (47 prosent) av produksjonen, mens Sverige har en termisk produksjon på omkring 10 prosent. Norge har en svært høy andel grønn produksjon, og 2008 var den termiske kraftproduksjonen på beskjedene ett prosent (Nordel 2008). Ved igangsetting av gasskraftverket på Mongstad vil termisk produksjonskapasitet i Norge øke til 8 TWh. Med fremskrevet energiforbruk på 126 TWh vil sort produksjon utgjøre omkring seks prosent av den norske kraftproduksjonen (NVE 2009).

Med utgangspunkt i tallene for de nordiske landene¹⁵ har jeg foretatt en simulering med ulik initial energisammensetning. I det følgende er elastisitetene som over og omfanget av markedet er ikke justert i forhold til landene. Det vil si at initial omsatt mengde kraft er på 126 TWh for alle landene.

I figur 52 er de ulike landenes utgangspunktsnivå for den sorte energiproduksjonen. Fra dette kommer det frem at alle reduserer mengden sort energi produsert, uavhengig av størrelsen på sektoren.



Figur 52 Utvikling i sort energi produsert ved ulikt andelsutgangspunkt

¹⁵ I rapporten meldes det om ikke-eksisterende termisk produksjon på Island (Nordel 2008).